

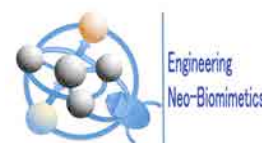
生物規範工学

Engineering Neo-Biomimetics



文部科学省 科学研究費 新学術領域

「生物多様性を規範とする革新的材料技術」



CONTENTS

文部科学省 科学研究費 新学術領域
「生物多様性を規範とする革新的材料技術」

(1) 巻頭言

- ・ 産業と社会を考える「生物隠喩実学」の提案

妹尾 堅一郎(NPO法人 産学連携推進機構 理事長)10

(2) 評価委員からのメッセージ

- ・ 「自然化社会」の実現に向けて

赤池学(ユニバーサルデザイン総合研究所所長)..... 14

(3) 研究紹介

2013 年 6 月 20 日 産業技術総合研究所 臨海副都心センター 高分子学会バイオミメティクス研究会

- ・ バイオミメティクスのビジネス展開に関する新たな動きとデータベースへの期

平坂 雅男(高分子学会)..... 19

- ・ バイオミメティクス画像検討会から得られたもの

下澤 楯夫(北海道大学)..... 22

- ・ ビッグデータ時代の発想支援型検索とバイオミメティクス画像データ

長谷山 美紀(北海道大学大学院情報科学研究科) 24

- ・ バイオミメティクス・オントロジーの産業応用と国際標準化

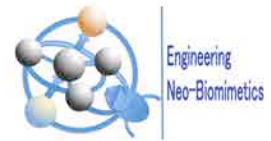
溝口 理一郎(北陸先端科学技術大学院大学)

古崎 晃司(大阪大学・産業科学研究所) 26

- ・ 地域の連携を中核とするバイオミメティクス日仏アライアンスに向けて

星野敬子(滋賀県立大学) 29

- ・ 自然模倣技術・システムの可能性～環境・生命文明社会への貢献～



(4) 2014 年7月31-8月1日 新学術領域「生物規範工学」全体会議・合同研究会

・自己組織化を利用した耐久性階層構造の作製

Preparation of Durable Hierarchical Structures by Self-organization

B01-1 班 平井 悠司 (千歳科学技術大学).....34

・カテコール化合物を利用した高分子材料の表面改質

Surface modification of polymeric materials by catechol derivatives

B01-1 班 小林 元康 (工学院大学 工学部 応用化学科).....36

・乱れた構造が創る頑強な機能について一尺度不干渉性の観点から

Robustness of functions arising from an irregular structure - from the view point of noninterference among scales

B01-2 班 久保 英夫 (北海道大学大学院理学研究院).....39

・自己組織化形成プロセスによるタマムシ模倣表面の創製

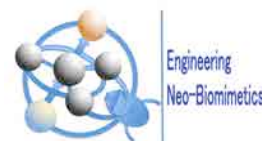
Development of Biomimetic Surfaces of a Jewel Beetle by a Self-Organization Process

B01-2 班 石井 大佑 (名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター).....42

・バイオミメティクス・データ検索基盤の実現と技術創出

Realization of Biomimetics Data Retrieval Platform and Technological Innovation

A01 班 長谷山 美紀 (北海道大学大学院情報科学研究科).....44



- ・ 昆虫、鳥類及び魚類の表面構造の画像を収録したデータベース構築

Progress Report on Building an Image Database of Surface Structures of
Insects, Birds and Fishes

A01 班 松浦 啓一 (国立科学博物館).....46

- ・ 持続可能な社会に求められるテクノロジー開発手法の創成に向けて

Development of the Technology for the Creation of Sustainable Society

C01 班 石田 秀輝 (地球村研究室).....49

- ・ 生物機能を工学技術に転用するための支援方法 ―バイオTRIZデータベース―

Design of new functional materials by bio-TRIZ data base

C01 班 山内 健 (新潟大学工学部).....51

- ・ スズメ蛾とハチドリの柔軟翼が同じ法則に従う変形で空気力学性能を向上するのか？

B01-5 班 劉 浩 (千葉大学工学研究).....54

- ・ 細胞運動における弾性境界曲率応答性の原理探究

Study on the curvature effect of elasticity boundary on cell motility

B01-5 班 木戸秋 悟 (九州大学先端物質化学研究所).....56

- ・ ガルの受容体によるフェロモンブレンドの検出機構の解明

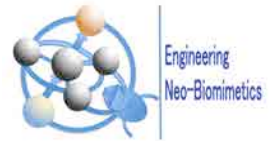
Elucidation of detection mechanism of pheromone blend in moth

B01-4 班 光野 秀文 (東京大学先端科学技術研究センター).....58

- ・ カミキリムシにおける振動情報の機能解明と害虫防除への応用

Vibration Signals in Cerambycid Beetles and their Application to Pest Control

B01-4 班 高梨 琢磨 (独立行政法人 森林総合研究所 森林昆虫研究領域).....60



・昆虫から学ぶ接着技術

Bonding technology learning from insects

B01-3 班 細田 奈麻絵 (独立行政法人 物質・材料研究機構).....62

・自己修復型防錆皮膜

Anti-Collosion Films With Self-Repairing Properties

B01-3 班 穂積 篤 (独立行政法人産業技術総合研究所).....64

・バイオミメティクス・データベースのオープンイノベーションプラットフォームへの展開

Biomimetics Database as a Platform for Open Innovation

公募 班 有村 博紀 (北海道大学大学院 情報科学研究科).....66

・自己組織化シワによる小型羽ばたき機用翼膜の剛性制御

Stiffness Control of Wing Membranes with Self-Organized Wrinkles for Micro Ornithopters

公募 班 田中 博人 (千葉大学).....69

・材料科学からアプローチするバイオクレプティックス

Biokleptics with Materials Science Approach

公募 班 出口 茂 (独立行政法人海洋研究開発機構).....71

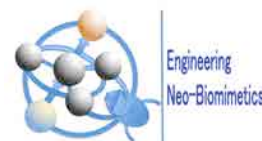
・微粒子由来凹凸構造を利用する気液分散体の安定化

Stabilization of Gas-Liquid Dispersed Systems Utilizing Rough Surface Structure Formed by Particles

公募 班 藤井 秀司 (大阪工業大学).....73

生物多様性を規範とする革新的材料技術

Innovative Materials Engineering Based on Biological Diversity



・シュミットニールセンの「スケーリング：動物設計論」を翻訳して～下澤教授に教えられたこと

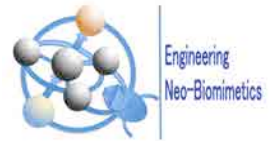
Japanese translation of "Scaling: Why is animal size so important" and What I've been taught by Professor T. Shimozawa

浦野 知 （株式会社ペコ I P Mパイロット）75

・マーク・デニー著「空気と水」について

On book "Air and Water" by Mark Denny

総括班 評価グループ 下澤 楯夫 （北海道大学）80



(5) トピックス (PENより)

・SMALL TALK -空気抵抗低減用のサメ肌模倣リブレット表面構造の“耐久性”が実際の旅客機の翼で試されている -バイオミメティクス研究開発の長期動向を垣間見る-

産総研ナノシステム研究部門ソフトメカニクス研究グループ 研究グループ長
大園 拓哉 85

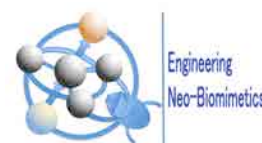
・SMALL TALK -人エトロボの飛ぶ時代-

産総研 生物プロセス研究部門 二橋 亮..... 87

・寄稿 -材料系バイオミメティクス研究の動向と今後の展開-

独立行政法人物質・材料研究機構 ハイブリッド材料ユニット 細田奈麻絵
株式会社 LIXIL 分析・評価センター 井須紀文
三菱レイヨン株式会社 横浜研究所 魚津吉弘
株式会社積水インテグレートリサーチ 佐野健三
独立行政法人森林総合研究所 森林昆虫研究領域 高梨琢磨
独立行政法人海洋研究開発機構 海洋生命理工学研究開発センター 椿玲未
独立行政法人物質・材料研究機構 ハイブリッド材料ユニット ノエマン ピーター ライ
オシュ
公益社団法人高分子学会 平坂雅男
学校法人千歳科学技術大学 バイオ・マテリアル学科 平井悠司
独立行政法人物質・材料研究機構 先端フォトニクス材料ユニット 不動寺浩
独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 穂積篤
国立大学法人京都大学大学院農学研究科農学部応用生命 森直樹

..... 89



(6) 国内外研究動向紹介

・日本化学会第94回春季年会 ATPセッション 新材料開発最前線 「連携が支えるバイオミメティクス」に参加して

産学連携グループ: 三菱レイヨン株式会社 横浜研究所 魚津吉弘 95

・日本化学会第94春季年会アドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP) 「連携が支えるバイオミメティクス」に参加して

株式会社豊田中央研究所 先端研究センター 中野 充..... 97

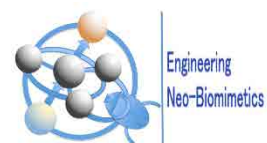
・14-1バイオミメティクス研究会レポート

滋賀県立大学 星野敬子..... 100

(7) 新聞・報道102

(8) アウトリーチ活動106

(9) 各種案内108



(1) 巻頭言

産業と社会を考える「生物隠喩実学」の提案



2014/07/22

NPO 法人 産学連携推進機構 理事長
妹尾堅一郎（せのお けんいちろう）

「生物規範工学」あるいはバイオミメティクスの可能性と奥深さを下村先生にご教示いただいてから数年、この領域の産業的可能性は加速度的に拡大していると感じている。そのことについて、巻頭言で書かせていただく。

生物規範工学の可能性

「技術で勝るが、事業で勝てない」状況が陥った日本の産業が、どのようにして産業競争力の再生に向かえば良いか。俯瞰的な産業生態系の話やビジネスモデルと知財マネジメントの関係を研究している筆者にとって、その一つの起点として「生物規範工学」に大いに期待したい。その理由は、「生物規範工学」が、プロダクトイノベーションとプロセスイノベーションの双方の発想源泉になるからだ。

一方で、生物を規範として置くことによって、画期的な高機能構造の形態が生み出される可能性があることは言うまでもない。つまり、プロダクトイノベーションである。他方、その形態生成（多くは自己組織化）する場合、従来の工学では多大なエネルギーを使わざるをえないが、生物は省エネで行う。この生成メカニズムを規範とした生産手法が開発できれば、それは強大なプロセスイノベーションとなるだろう。

ユニバーサルな工学とユニークな自然観

ところで、生物規範工学を2つのU（Universality と Uniqueness）という観点からみてみよう。その技術・システムはユニバーサルなものであるが、他方、文化的にはユニークな自然観に関わる。生物規範工学は、実は、西洋的な自然観よりむしろ東アジア的な自然観に近いのではなかろうか。特に、八百万に神が宿るという我々日本人が持つ自然観や、あるいは日本的思考の古層の上

に根付いた「雑種文化」は生物規範工学と親和性があるように見えるのだ。

少々極端な話をしよう。たとえば、やなせたかし氏の名作「アンパンマン」には、「自己犠牲・他者貢献」と、バイキンマンを完全にはやっつけないという「生態学的共生」の 2 つのコンセプトが含まれており、それは日本人の食と農と自然観を体現しているのではないか。生物規範を深めていくと、技術・システムだけでなく、我々が持っている価値観や思想、文学的・詩的なものまでも含めた議論に展開できそうである。

生物の世界をメタファーとして人間社会を考え実践する「生物隠喩実学」

さらに、筆者は、自然の生態系をメタファーとして、産業の生態系、社会の生態系、思考の生態系など、いろいろな生態系を再検討できるのではないかと考えている。そのためには、個体と集合体や群体などの関係を整理し、また哲学的背景をしっかりと押さえておきたい。

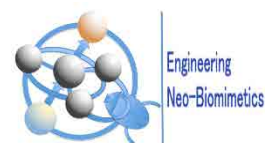
個体の機能構造的形態だけでなく、生物の多様な個体行動・集合行動や社会形態と運営等に学び、そこから次世代の社会やビジネスのあり方へのヒントが得られそうである。つまり、生物の世界をシステムとしてとらえ、それを産業生態系と照らし合わせることによって、我々は多くのことに「気づき・学び・考える」ことができるのではないかと期待できるのである。

筆者も、従来から事業や産業について、生物学の概念を援用して議論を行ってきた。たとえば、成長 (growth)・発展 (development)・進化 (evolution) の概念をメタファーとしてイノベーション論を整理し、また「産業生態系」といったメタファーを使って産業俯瞰的なビジネスモデルのあり方を議論してきた。

こういった分野を、「生物規範工学」に対応して、「生物隠喩実学」と呼んでみてはどうだろうか。新たな学際的知見が得られそうである。まずその研究会を立ち上げてみたいものだ。

さて、この 6 月、生物規範工学を支援している科学技術ジャーナリスト・赤池学氏の新著『生物に学ぶイノベーション～進化 38 億年の超技術～』(NHK 出版新書) が上梓された。この新書は、分かり易く、かつポイントが明確に示されている優れた啓発書である。多くの人に「生物規範工学」の可能性を知ってもらうためには超お奨めである。また、白石拓編集『バイオミティクスの世界』

(別冊宝島 2199)も出版された。図解が豊富で読みやすい。これらの啓発書が切掛けになって、多くの人々がさまざまなヒントを得てくれることを期待したい。
(了)

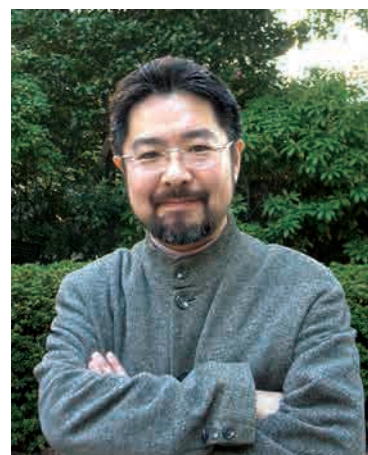


(2) 評価委員からのメッセージ

評価委員からのメッセージ

「自然化社会」の実現に向けて

赤池学(ユニバーサルデザイン総合研究所所長)



近代以降信奉されてきた無限に続く右肩上がりのモデルは、物質的な豊かさを自動制御的に供給する「自動化社会」を定着させ、その一方で環境破壊に象徴される負の遺産を蓄積してきた。こうした反省を踏まえ先進国は、エネルギーのベストミックスに象徴される「最適化社会」を模索していた。「東日本東大震災」は、まさにこうした最中に起こった。

放射能被害に関わる統制的報道が流れるなか、人々はFACE BOOKの情報やYou Tubeの映像で、真実の放射能汚染の実態を知った。そこにおいて多くの人は、そもそも中央依存の「最適」が、信ずるに足らないものであることを確信したように思える。

こうした虚の中央報道と、実を伝える情報技術の成熟は、妄想としての最適化社会幻想を打ち砕き、これから我々を「自律化社会」へと導くだろう。情報技術が普遍化し、個人や企業が学習能力を大きく高めることで、より正しい個人的な判断を行なうことが可能になる。人々は、自分や地域に合った価値基準により、自ら計画し、行動し、地域の地政学や、個々人の経験や関係性のなかで、能動的な自律化を目指していくことは確実である。

さらに、それぞれの自律的な行動を通じて、新たな秩序を形成してゆくことが可能であることに気づけば、科学や技術、経済や社会のなかに、生態系サービスや自然のメカニズムを組み入れ、人間を自然な存在に改めて回帰させることが可能なのだという認識が共有化された「自然化社会」へとさらなる移行を果たすように思える。「生物規範工学」の活動は、こうした社会形成の観点からも、これから熱い注目を浴びるものと確信している。

しかし、そこには課題もある。

第一は、生物模倣工学の多くの成果が、X線構造解析やナノテクノロジーなどの先端科学技術の進展を通じてもたらされたものであることは言うまでもないが、研究領域を「先端」に求めるだけでなく、ローテク技術や伝統技術の再考や革新を、その視野に入れて欲しいということだ。

例えば、ステンレス表面の酸化膜の膜厚をメッキの技術で制御すると、光の屈折干渉が起きて、化学塗料を用いない様々な発色が形になる。リサイクルすれば、ムクのステンレスに戻ってしまうこの「酸化発色」の原理は、積層構造がもたらす構造色である。環境負荷のないステンレスメッキは、決して真新しいものではないが、溶媒、溶剤双方の環境影響が問題視されている、例えば自動車のボディ塗装など、広範な産業領域に拡大する可能性を秘めている。

また、屈折干渉による発色技術は、例えば伝統的な漆器にも用いることが可能である。漆の塗膜表面にレーザーやイオンを照射すれば、同様の干渉色を発する構造色漆器が誕生する。生物を規範とするノウハウを是非、伝統産業の復興にも援用して欲しいと思う。

第二は、バイオテクノロジーとの境界を取り払って欲しいということだ。新しい学術領域である生物規範工学は、「生物模倣」に基づく材料開発に主眼が置かれ、生物そのものを活用する研究開発は、従来のバイオテクノロジーの範疇に位置づけられている。

しかし、UV-A を遮断する家蚕、UV-A、B の双方を遮断する野蚕のシルクが、紫外線によるシミや皮膚癌予防、繊維芽細胞を活性するシルク化粧品や、シルクタンパクが持つ中性脂肪の代謝促進効果による脂肪肝や糖尿病予防の機能性食品としてすでに様々な商品化が進んでいるように、シルクタンパクの微細構造や化学組成を解析し、高分子の人工設計に応用するだけでなく、シルクそのものを使うこと、その合理的な生産技術を開拓することを含めて、生物規範工学を発展させて欲しいと考えている。

同様のことは、抗癌性が認められているモズクなどの海藻や、鶏卵、昆虫卵の卵黄に含まれるフコイダンなどの機能性多糖類についても言えることである。生物が生産する機能性高分子の解析は今後、新しい医薬開発の重要な研究領域として注目されることは確実である。さらに、白樺の木のスベスベの皮も、ベチュリンという高分子が作った自然のプラスチックだ。植物が分泌するプラスチックも、生物規範工学で捉え直すと、生分解性プラスチックに留まらない、様々な可能性が生まれてくるはずである。

生物規範工学が、生物模倣と生物利用の相補的な研究を戦略的に行えば、素材ビジネスは大きな飛躍を遂げるだろう。貝類が生産する水中接着剤、それらによる生物付着に導電性ポリマーを活用する試み、磁性材料や凍結材料を生産する微生物など、模倣工学者がこうした生物素材の世界に目を向ければ、そこ

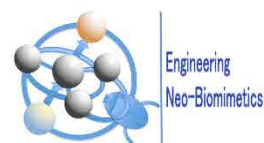
から新しい生物模倣型の機能性素材を無尽蔵に設計開発することが可能になるように思える。こうした研究は、高圧下や有機溶媒の中など、人工条件下で働く機能性酵素の人工合成などにも将来的には結実していくことだろう。「生物に学び、生物を活かす」という二眼レフの研究活動を是非、期待したいと思う。

こうした生物規範工学の研究と実用化を推進していくためには、生物学者を中心とする基礎科学者との連携が言うまでもなく不可欠である。そのためには、応用工学者のみを優遇してきたこれまでの対応を改め、理学部の研究者層を厚くしていく政策が求められる。また、こうした基礎研究の高度化を図るためには、生物規範工学の実用化を目覚めた企業とともに進める、国家的な研究クラスターを早急に立ち上げるべきである。

昆虫や藻類など、ヒト以外の生物の生理、生態、品種、遺伝子の研究知見は、地道ながら日本には豊富な蓄積がある。あるいは、昆虫に代表される未利用の生物資源も、日本を中心としたアジアの固有資源でもある。この部分でデファクトスタンダードを取るという戦略には、アジア諸国の科学者たちや企業も賛意を示すはずである。

石油資源と水資源の危機が叫ばれる 21 世紀において、再生可能な生物資源の知的活用を促す生物規範工学は、「自然化社会」の最もわかりやすいシンボルとなり、社会周知の観点からも、生活者に対して大きなメッセージやインパクト

を与えるはずである。地球社会システムを持続させるためにも、生物模倣と生物活用を両輪で進めていく技術開発は、日本がそのリーダーとなるべき戦略領域だと確信している。



(3) 研究紹介

14-1 バイオミメティクス研究会

バイオミメティクス推進協議会－発想支援型知識インフラを 基盤とするオープンイノベーション・プラットフォーム－

＜趣旨＞ 日本におけるバイオミメティクスの産業化を進める産学官連携プラットフォームとして、特定非営利活動法人「バイオミメティクス推進協議会」を設立する運びとなりました。バイオミメティクス研究の知見を活用し、国際標準化、国際連携、地域連携、博物館連携を利用した教育啓発事業などを通じて、持続可能性に向けたパラダイムシフトとイノベーションに基づく新ビジネス創出を目指します。バイオミメティクスは生物多様性を原資としており、その有効利用がパラダイムシフトの成否を握っています。生物学のデータベースは、画像もテキストもある、いわば“メガデータ”であり、膨大な生物学データからエンジニアリングへのリエゾンによってもたらされる発想支援がキーポイントになります。今回の研究会は、「バイオミメティクス推進協議会」の役割と「情報科学による工学と生物学の融合」、「バイオミメティクスが橋渡す環境地域国際連携」を主題にいたします。

主 催 高分子学会 バイオミメティクス研究会 ISO/TC266 バイオミメティクス国内審議委員会
共 催 科学研究費新学術領域「生物規範工学」
協 賛 アスクネイチャー・ジャパン モノづくり日本会議ネイチャー・テクノロジー研究会
日 時 平成 26 年 6 月 30 日(月) 13:00～17:50
会 場 産業技術総合研究所 臨海副都心センター 別館 11 階会議室
(東京都江東区青海二丁目 4 番 7 号 4-2-2 電話：03-3599-8001)
交 通 新交通ゆりかもめ「船の科学館駅」「テレコムセンター駅」下車徒歩約 4 分
東京臨海高速鉄道路りんかい線「東京テレポート駅」下車徒歩約 15 分
(<http://unit.aist.go.jp/waterfront/>)

プログラム

＜13:00～13:05＞

1. 開会挨拶 (高分子学会バイオミメティクス研究会運営委員長) 下村 政嗣

＜13:05～13:50＞

2. バイオミメティクスのビジネス展開に関する新たな動きとデータベースへの期待
(高分子学会) 平坂 雅男 1

＜13:50～14:35＞

3. バイオミメティクス画像検討会から得られたもの
(北海道大学名誉教授) 下澤 楯夫 3

＜14:35～15:20＞

4. ビッグデータ時代の発想支援型検索とバイオミメティクス画像データ
(北海道大学情報科学研究科) 長谷山美紀 5

＜15:20～15:30＞ 休 憩

＜15:30～16:15＞

5. バイオミメティクス・オントロジーの産業応用と国際標準化
(北陸先端科学技術大学院大学) 溝口理一郎 7

＜16:15～17:00＞

6. 地域の連携を中核とするバイオミメティクス日仏アライアンスに向けて
(滋賀県立大学) 星野 敬子 9

＜17:00～17:45＞

7. 自然模倣技術・システムの可能性～環境・生命文明社会への貢献～
環境省「平成25年度自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討業務」より
(富士通総研) 長谷川 誠 11

バイオミメティクスのビジネス展開に関する新たな動きと データベースへの期待

(高分子学会) 平坂 雅男

E-mail:m.hirasaka@spsj.or.jp

1. はじめに

バイオミメティクスに関する投稿論文や学術会議は 2000 年初めから急激に増加し、2011 年には、年間で 2800 を超える論文、本、会議報告などが公表されている[1]。そして、高分子学会にバイオミメティクス研究会が 2012 年に設立されて 2 年が経過し、学術研究のみならず産業界からも大きな関心がたれるようになった。

一方、2012 年にはドイツが ISO（国際標準化機構）にバイオミメティクスの国際標準化を提案し、TC266 (TC: Technical Committee) Biomimetics としてタートした。そして、2013 年には、標準化の骨子が明らかになったことから、「ドイツの国際標準化の動きが日本に与える打撃について」の新聞報道も行われている[2]。さらに、欧米での産業界の動きが活発化している。ドイツのルフトハンザ航空は機内誌で同社のバイオミメティクスの応用事例を紹介し、また、米国では、モーターショーでバイオミメティクスのデザインショーまで開催されている。このような現状をみると、日本は周回遅れといわざるを得ない。

日本において、バイオミメティクスの産業展開が遅れている大きな理由には、国内のバイオミメティクスに関する情報の一元化と産業応用を支援する仕組みづくりがないことがあげられる。また、企業では、バイオミメティクス関連の製品の短期的な収益を重視しすぎ、本来のバイオミメティクスが引き起こす研究開発のパラダイムシフトへの気づきが遅れている。このような課題を克服するためには、BIOKON¹のような日本型のコンソーシアムが必要であると感じている。

今、バイオミメティクスの分野で生物学と工学の知識融合が進行している段階で、新たな研究開発プラットフォームの構築は、企業にとって競争優位を築くひとつのチャンスである。この研究開発プラットフォームの構築は、工学のみならず生物学の知識融合が必要であり、企業が今までに経験したことのない領域での取り組みでもあり、このような観点からもコンソーシアムの設立とその役割が期待されている。

2. 期待される研究課題と産業界の期待

(1) 画像データベース

新学術領域「生物多様性を規範とする革新的材料技術」の研究で生物規範工学の体系化の一環として、生物学と材料工学とを融合するための画像データベースの構築と検索エンジンの開

¹ <http://www.biokon.de/>

発が行われており、この取り組みに対する企業の関心が非常に高い。しかしながら、このシステムを企業で活用してもらい、また、製品化に結びつけるためには、俗に言う「人、モノ、金」が十分でない状況であり、現在は、すべての企業ニーズに対応できない。

また、画像データベースの拡充については、博物館や研究機関からのデータ収集と共に、最近では、高分子学会と日本顕微鏡学会との連携など新たな動きが始まった。

(2) 構造模倣からプロセス模倣へ

「バイオミメティクス＝構造模倣」の概念から脱却し、生物の動的機能や行動形態からヒントを得て新技術の開発することは、限られた専門知識によって技術開発する既存の研究開発のプラットフォームからの脱却であり、新たなプラットフォームでの研究開発となる。このプラットフォームの構築には、生物学・工学の研究者の連携ばかりでなく、企業の研究者や企画担当が参画した三者の連携が必須と考えている。また、技術の成長および展開が期待されるバイオミメティクスのプロセス技術の開発に対して、政府の研究助成などの施策が期待される。例えば、高分子科学領域では、自己発現型機能（自己組織、自己修復、自己洗浄などの Self-X Technology）などに対しての期待が高い。

(3) ナノスーツからの計測機器への展開

生物の電子顕微鏡観察は、凍結乾燥や組織固定などの特有の前処理によって生物の構造を観察することが常識であった。しかしながら、浜松医科大学の針山孝彦教授らによって非常識と思える「生きたままの生物の構造を観察するナノスーツ法」が開発された[3]。この電子顕微鏡観察手法は、従来の観察手法によるアーティファクトを回避することができ、バイオミメティクス領域の研究に留まらず、医薬・医療分野での革新的な発展につながると考えられている。産業界へこの技術を普及させるために、文部科学省のナノテクプラットフォームの電子顕微鏡の活用などが考えられる。

3. ビジネス展開

バイオミメティクスに関する日本型コンソーシアムが無いことから、ビジネス展開を推進するための組織が必要とされている。また、新学術領域としての生物規範工学の体系化により生物学と工学の連携研究が加速し、これによって形成された知識基盤を産業界に結びつける仕組みづくりも必要となる。このような新たな産業プラットフォームに構築は、産業界からの要望も高く、また、各企業の具体的なニーズに対応することができるようになる。そこで、特定非営利活動法人バイオミメティクス推進協議会が発足し、その役割を担おうとしている。

バイオミメティクス推進協議会は、前述した画像データベースの活用やナノスーツの技術指導に加え、企業に対する戦略および技術コンサルティングを提供する予定である。また、標準化に伴うバイオミメティクス認定制度、さらには、バイオミメティクスの産業化推進策などの検討を行う共に、政府への政策提案も予定している。今後、このバイオミメティクス推進協議会が、グローバル連携を含めて、この分野で日本を先導する組織となることを期待する。

参考資料

- [1] N.F Leporal, *et al.*, “ The state of the art in biomimetics.” ,Bioinspir. Biomim. 8 (2013) 013001.
- [2] 日刊工業新聞 (2013 年 12 月 18 日)
<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0520131218cbaf.html>
- [3] I. Ohta, *et al.* “ Dressing living organisms in a thin polymer membrane, the NanoSuit, for high-vacuum FE-SEM observation.” Microscopy (2014): dfu015.

バイオミメティクス画像検討会から得られたもの

北海道大学 名誉教授 下澤 楯夫

電話 011-898-2553

E-mail tsmz@es.hokudai.ac.jp

生物は、少数のありきたりな元素（CHOPiNS）のみから成るにもかかわらず、実に多様な「生きる仕組み」を実現している。例えば、コガネムシは金属原子を1個も使うことなく黄金色を作り出しており、アメンボはフッ素原子を1個も使うことなくほぼ完璧な撥水性を実現している。その秘密は、物質のバルクの特性に頼るのではなく、微細な構造によって機能（生きる仕組み）を作り出していることにある。生物の生きる仕組みを解明する生理学では、構造の無い機能は幽霊であり、機能の無い構造は死体である。

ある特定の構造の機能は一つとは限らない。機能とは、構造と環境の相互作用の別名だから、対象や状況によって表出の度合いは異なる。単一の構造も複数の機能を持つ、と考えるべきである。ある特定の機能を果たすべく人為的に作り出された構造や製品も、他の用途・機能に転用し得る。生物の進化は、実はこのような転用の歴史であり、生物の構造が果たす機能の多重性は、進化に本質的に関わっている。バイオミメティクスは工学であると同時に、生物学そのものの強化をもたらす。走査電子顕微鏡による生物体表の画像データの検討から見た機能の多重性と、その意外な効用の例を紹介する。

エゾハルゼミ翅表面は、直径 100 nm、高さ 250 nm 程のナノパイルで覆われている（図 1）。この翅は光学的に非常に透明で反射も少ないところから（図 2）、このナノパイル構造は蛾の眼の表面（モスアイ）の機能として知られる無反射性にあると想定された。

しかしその後、浜松医大の針山孝彦氏や国立科学博物館の野村周平氏によって、アブラゼミなどの不透明着色翅面にも同様のナノパイル構造が確認され、無反射性はともかく、光学的透明性の生物学的意義は疑問となった。

微細な突起構造は素材の撥水性を強調する（水表面を激しく凹凸させるには大きな表面エネルギーを要する）ことが知られている。エゾハルゼミ翅表面での水の接触角を測定したところ、160 度以上の超撥水性を示した。羽化の際に夜露に濡れる危険の多いセミにとって、体表の超撥水性は窒息と翅の伸展不良を防ぐ、生存に必須の機能であろう。

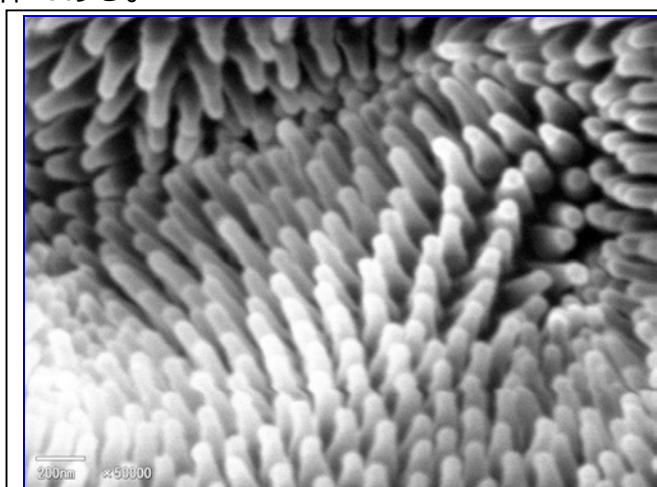


図 1. エゾハルゼミ前翅背面のナノパイル構造、

Scale bar=200nm



図 2 エゾハルゼミ翅の透明性

一方、セミの仲間（カメムシ、ウンカなど）は後胸飛翔筋が退化しており、飛翔の際は後翅を前翅に「引っ掛け」て駆動する。エゾハルゼミの引っ掛け（ヒッチ）装置は、後翅前縁の鉤（フック）が前翅後縁の長い溝（キャッチ）を受ける構造

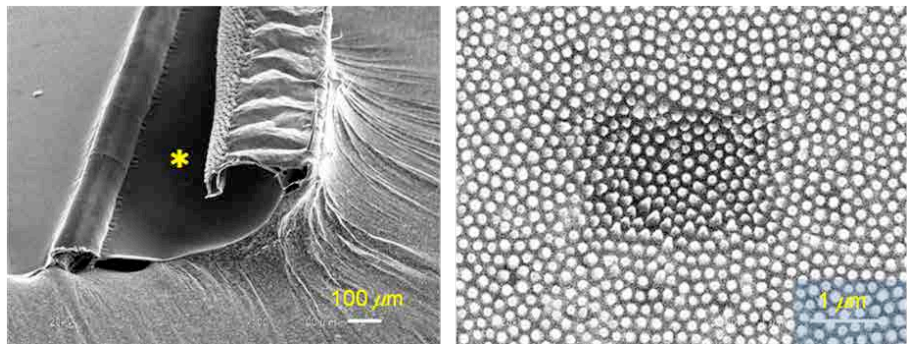


図 3. エゾハルゼミ前翅後縁キャッチ溝内面（*印）のナノパイル

造をしている。前翅の回転中心（関節）と後翅のそれは前後に数 mm 離れており、飛翔中に翅が往復運動すると、フックがキャッチ溝を数 mm にわたって摺動する。その摺動部内面はナノパイルで覆われており（図 3）、フックとキャッチの実効接触面積を小さくして摩擦（または摩耗）を減らす効果を想像させる。前出の針山氏は、垂直な OHP シート面上を歩行できるアリでも、アブラゼミのナノパイル翅面を歩くことは出来ず、低摩擦面として生物学的な捕食防止効果を確認した。

この様に、セミの翅のナノパイル構造は 1.無反射性、2.超撥水性、3. 低摩擦性の少なくとも三重の機能を持っている。さらに針山氏は、生物体表のナノパイル構造がこれら三重機能を持つのなら、人工のナノパイル構造も多重機能を持つ筈だと予見した。モスアイ型無反射フィルムの大面積加工技術確立した三菱レイヨン魚津吉弘氏の協力を得て、各種昆虫のモスアイ型無反射フィルム上での歩行能力を調べたところ、アリやカメムシ、ナナホシテントウを初め実験に用いた害虫(16 目 31 種)全てに対して、優れた「滑落フィルム」として転用できることを見出した。

多くの昆虫の肢には微細な接着毛があり（図 4）、毛管接着力やファンデルワールス力によって、ガラスの下向き面を逆さ釣りでも歩き回れることが知られている。殺虫剤を使わずに農業害虫を捕殺する方法として、従来から光で誘引した害虫を水盤に落とし込む「誘蛾灯」が用いられている。しかし平滑面を逆さ釣りでも垂直でも歩ける接着毛を

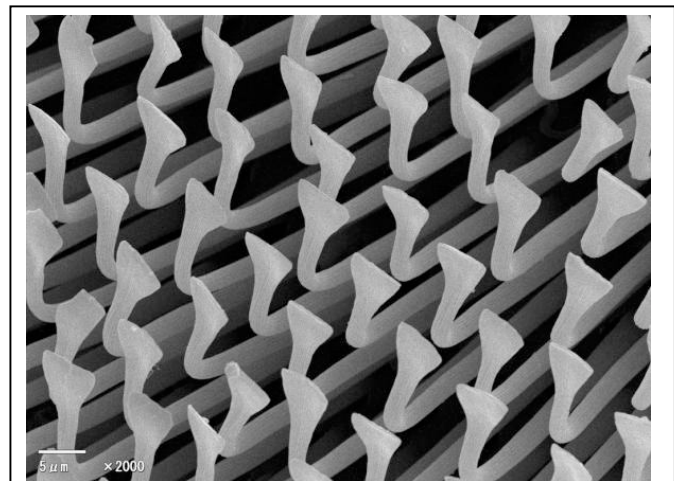


図 4. ハムシ肢表面の接着毛。Scale Bar=5μm

持っているのだから、害虫の多くが水盤に落ちること無しに誘蛾灯のガラス面を「歩いて出て」来てしまう難点があった。モスアイ型無反射フィルムを転用した「滑落フィルム」で光源面を覆うことで、水盤への転落効率を格段に上げた「誘蛾灯」や「発生予察灯」の実用化が進んでいる（参考文献 1）。

参考文献 1：針山孝彦、魚津吉弘、向井裕美、山濱由美、弘中満太郎、高久康春、石井大佑、大原昌宏、野村周平、長谷山美紀、原滋郎、下澤楯夫、下村政嗣、「エントモミメティクスと害虫制御」、日本応用動物昆虫学会誌、2014、印刷中

ビッグデータ時代の発想支援型検索とバイオミメティクス

画像データ

(北海道大学大学院情報科学研究科) 長谷山 美紀

電話 011-706-6077 FAX 011-706-6077

E-mail miki@ist.hokudai.ac.jp

URL <http://www-lmd.ist.hokudai.ac.jp/>

はじめに

バイオミメティクスは、生物の構造や機能から着想を得て、新しい技術を開発する科学技術である。膨大な生物学データから工学へ繋げる発想支援が重要な役割を担うとされ、新しい画像検索基盤の実現が開始された。生物データベースには大量の画像が含まれており、これを活用することによって、テキスト情報による検索の限界を超えた『バイオミメティクス検索基盤』を実現する試みである。バイオミメティクスデータ検索基盤は、今まで昆虫や鳥類、魚類など個別のデータベースに蓄積されたデータを統合し、材料科学や機械工学など広く工学研究者や産業界の利用を可能とする。本文では、バイオミメティクスデータ検索基盤の試作システムを紹介し、具体的に検索結果を示すことで、生み出される工学的発想について議論する。

バイオミメティクスデータ検索基盤と工学的発想の支援

バイオミメティクスデータ検索基盤は、利用者の発想を支援する発想支援型の検索理論に基づき実現されている¹⁻⁵⁾。この理論は、大量の画像データをその類似性に基づき自動で配置し、データベース全体を俯瞰可能とする。バイオミメティクスデータ検索基盤の試作システムの様子を図に示す。図中システムの検索対象データは、国立科学博物館から提供された昆虫微細構造の SEM 画像 1229 枚である。システムには、画像を質問とした検索機能が備えられており、画像による画像の検索が可能である。この機能を用いることで、生物についての知識が少なく適切なキーワードを見つけられない場合でも、自身が持つ画像を質問として生物の情報を入手することができる。また、質問画像をデータベースへ登録することを要求しないことから、産業界に存在する開示困難な画像データを質問として、生物情報を検索することが可能であり、企業のデータ運用の実際に合わせた検索基盤の利用が可能である。例えば、図では、材料系研究者が生物の情報を検索することを想定し、昆虫画像データベースに材料画像を質問とした検索結果を示している。図 (a)は、オオタバコガのモスアイ構造、エゾハルゼミの翅、リュキュウアブラゼミの前翅膜面の SEM 画像の近傍に、材料として poly(dimethylsiloxane) (PDMS, シリコーンゲル)を利用し、ハニカムフィルムと微粒子を鋳型にして作られたマイクロレンズアレイ(モスアイ型 PDMS マイクロレンズアレイ)⁶⁾の画像が存在している。また、図 (b)では、エゾハルゼミの翅の断面画像の近傍にハニカムフィルムの上層を使ってシリコンをエッチングすることで作成されたシリコン突起構造アレイ(silicon nanospike-array)⁶⁾の画像が存在している。これらは、画像の特徴から互いが近傍に配置されたものであり、生物や材料など異なる分野の情報であっても、互いに表面構造が類似する画像であれば、検索が可能となることが理解できる。

以上のように、バイオミメティクスデータ検索基盤を用いることで、異なる分野の情報が画像の類似性によって関連付けられ、生物多様性を背景とした形態の類似性が可視化されることで新たな価値の創出が期待できる。

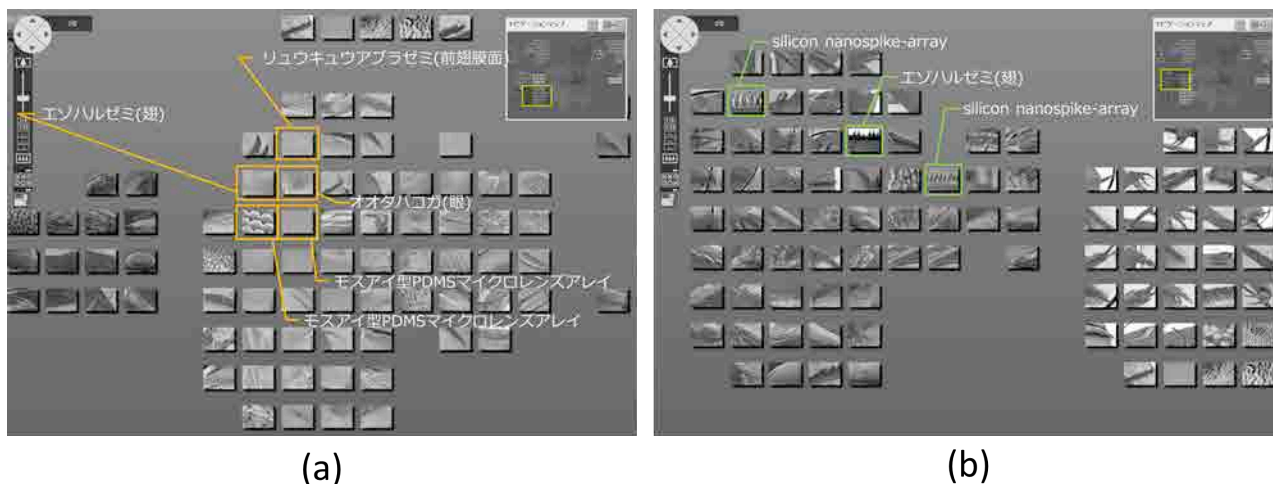


図 バイオミメティクスデータ検索基盤による検索結果の例

おわりに

異なる研究分野に蓄積された大量のデータの背景には、分野に固有の貴重な知識が存在する。貴重な知識には、言語化されにくいものも多く、他者が利用するのは容易ではない。社会が解決を望む問題は複雑さを増し、問題の所在さえ見え難い現状で、個別の研究分野の研究者に知識が留まっていたのでは、解決の方策を見出すには限界がある。バイオミメティクスは、現在の社会が抱える問題を解決する試みと捉えることができる。知識の蓄積としての異分野データベースの連携により産業創出を支援するために、産学連携プラットフォームの実現を推進する必要があると考える。

謝辞

本研究の一部は、『生物多様性を規範とする革新的材料技術』（科学研究費補助金 新学術領域研究（研究領域提案型）、代表 下村政嗣（東北大学・教授））および JSPS 科研費（課題番号：25280036）により行われた。

参考文献

- 1) 長谷山 美紀, “画像・映像意味理解の現状と検索インタフェース,” 電子情報通信学会誌, vol. 93, no. 9, pp. 764-769, 2010.
- 2) M. Haseyama and T. Ogawa, N. Yagi, “A review of video retrieval based on image and video semantic understanding,” ITE Transactions on Media Technology and Applications, vol. 1, no. 1, pp. 2-9, 2013.
- 3) M. Haseyama and T. Ogawa, “Trial realization of human-centered multimedia navigation for video retrieval,” International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 29, no. 2, pp. 96-109, 2013.
- 4) M. Haseyama, T. Murata and H. Ukawa, “A new image retrieval interface and its practical use in View Search Hokkaido,” The 13th IEEE International Symposium on Consumer Electronics, pp.851-852, 2009.
- 5) <http://imagecruiser.jp/light/demo.html>
- 6) Y. Hirai, H. Yabu, Y. Matsuo, K. Ijiro and M. Shimomura, “Biomimetic bi-functional silicon nanopike-array structures prepared by using self-organized honeycomb templates and reactive ion etching,” J. Mater. Chem., vol. 20, pp. 10804-10808, 2010.

バイオミメティクス・オントロジーの産業応用と国際標準化

(北陸先端科学技術大学院大学) 溝口 理一郎

(大阪大学・産業科学研究所) 古崎 晃司

電話 0761-51-1787 FAX 0761-51-1767

E-mail mizo@jaist.ac.jp

URL http://www.jaist.ac.jp/profiles/info_e.php?profile_id=614

1. バイオミメティクスと情報検索

バイオミメティクスでは工学と生物の交流が本質的である。工学は新しい機能を実現することをその使命としている。一方、生物はその進化の過程を通して様々な機能を実現している。その実現方式を参考にして、これまでにない新しい、あるいはより優れた機能を工学的に実現できる可能性がある。そのためには、そのような機能の実装方法とその機能を発見すること自体が問題となるが、本稿では後者に焦点を当てる。

技術者が解決したい問題、あるいは実現したい機能があるとき、まず欲しいものはヒントになる情報である。別の見方、新しい考えなどを知ることは思考の活性化に大きく貢献するが、ここで役に立つのがデータベース (DB) や WWW を用いた情報検索である。そこで重要な役割を担うのが Keyword であり、得られる情報の有用性は入力した Keyword に大きく依存する。有用な情報を見つけるためには、如何に適切な Keyword を入力するかが最も重要であると言っても過言ではない。しかし、適切な Keyword が見つかったとしても検索がうまくいく保証はない。言葉の「揺れ」の問題が控えているからである

2. シソーラスとオントロジー

情報検索における言葉の揺れの問題を Systematic な方法で解消するものがシソーラスである。シソーラスは類似した意味や関連する事柄を表す単語を組織的に整理したものであり、一つの Keyword で検索する代わりに、その Keyword と類似した概念を表す複数の Keyword と併せて検索することによって、より多くの関連情報を検索することができる。優れたシソーラスの具体例として、JST が長年かけて作り上げてきたシソーラスがある[1]。JST のシソーラスは強力であるが、バイオミメティクスの技術者が求めている情報を生物 DB から見つけるのは容易ではない。工学と生物の世界がかけ離れているからであり、その距離を埋める何かが必要となる。

異なるドメイン(概念世界)の橋渡しをするものとして、オントロジーが注目されている[2]。オントロジーとは、世界に存在する物事の本質的な構造を高い抽象レベルで表現したものであり、工学と生物のような異なるドメインの上位に位置して、両者をつなぐ役割を果たす可能性があるからである。オントロジーで補強されたシソーラスがあれば、適切な Keyword を見つけることをサポートするシステムの開発が可能になると期待される。

3. 具体例

現在実装されている 400 概念程度の小さなオントロジーを用いて、何ができるかを説明する[3]。言葉の揺れの問題は置いておき、技術者が「防汚」という機能を入力して、その実現に関係しそうな生物を探している状況を想定する。オントロジーとそれを用いた推論プログラムが、防汚機能を実現している可能性がある生物を数え上げた結果をグラフィカルに可視化したもの

が図1である。外周にはそれらの候補となる生物が並んでいる。現在注目されている蓮やカタツムリが現れているのは当然であるが、それ以外の多少怪しい生物も現れており、そこに思わぬ発見がある可能性がある。図には現れていないが、興味ある例として、例えば、防汚=>自浄=>親水=>集水=>砂漠=>サンドフィッシュという連鎖を経て、防汚からサンドフィッシュが候補の一つに挙げられた。この例が示すように、オントロジーには機能や属性、そしてそれらの間の関係が高い抽象度レベルでの関係としてかかれており、それを媒介として技術者の要求から、それに関連する生物を見つけ出している。図示された生物はあくまでも可能性があるというだけであって、本格的な調査に値するかどうかは定かではない。そこで、興味ある生物をクリックすると、インターネットを通してアクセス可能な情報源から少し詳しい情報を得ることができる。そして、そのようにして得られた情報から、より適切な Keyword 群を思いつくことができる。そして、シソーラスの助けを借りて本格的な情報検索を行うことによって、有用な情報を得る可能性が大きく膨らむ。

4. ISO における標準化

さて、上述の様なオントロジーで補強されたシソーラスは分野を横断するような検索をする上で有効な武器になりそうであるが、それをどのようにして構築すれば良いかを明らかにすることはバイオミメティクス研究開発にとって重要であると思われる。そこで、現在、千歳科学技術大学の下村（科学研究費：生物規範工学領域代表）等を中心として、ISO TC266 のWG4においてその構築過程の標準化の話が進んでいる。コンビナーはJSTの恒松氏で、筆者はProject leaderをつとめている。標準化を進めると同時にその実例として、JSTのシソーラスを核としたオントロジーで補強されたシソーラス、そしてその利用環境を構築する予定である。

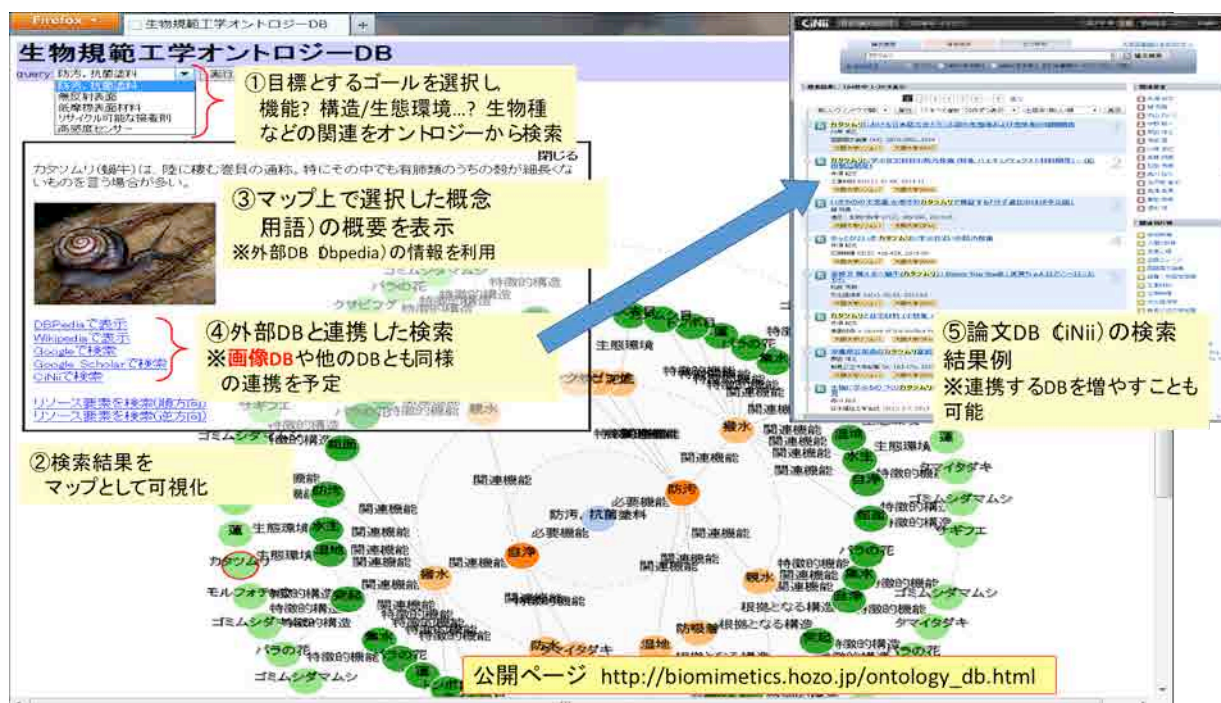


図1 Keyword 探索支援の具体例

< 参考文献 > [1] 國岡, 他: JST シソーラ

ス map, 情報管理, Vol.55, No.9, pp.662-669, 2012.

[2] 溝口理一郎: 役に立つオントロジー工学, PEN, ISSN 2185-3231, Vol.4, No.6, pp.3-13, 2013.

[3] 古崎晃司：バイオミメティック・オントロジーの試作と利用，日本化学会第 94 春季年会，1_F5_32，2014 年 3 月 27 日.

地域の連携を中核とする バイオミメティクス日仏アライアンスに向けて

滋賀県立大学 星野敬子

電話 0749-28-9851 FAX 0749-28-0220

E-mail hoshino.k@office.usp.ac.jp

滋賀県は、琵琶湖水系が育む豊かな自然に恵まれており、近畿地方の中核部に位置しながら土地の約 8 割が森林・耕地・湖という、里山や自然の風景が今も色鮮やかに残る地域である。2011 年 10 月この地を舞台に、自然の知恵をものづくり・まちづくりにつなげる推進団体、NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン (ANJ) [1]が設立された。同月、近江八幡市の関係機関 (ANJ、近江八幡市、近江八幡商工会議所、滋賀職業能力開発短期大学校) らが連携協力に関する協定を結び、活動をスタートした。以来、バイオミメティクスの製品開発に関わるコーディネートや、教育普及活動に取り組んでいる。

2013 年 4 月、ANJ アドバイザーの下村政嗣氏 (千歳科学技術大学) らが、フランスのサンリス (Senlis) 市を訪問し、欧州初のバイオミメティクス研究開発拠点 CEEBIOS (Centre Européen d' Excellence en Biomimétisme de Senlis) [2]構築計画を聞く機会を得た。現在、同市のフランス陸軍訓練所跡地 (100,000m²) に、研究センター、ビジネスセンター、会議・展示場、教育トレーニングセンター等の施設整備が進められている。

国際的なネットワークづくりに関心を持つサンリス市は、日本の活動事例として ANJ に注目し、下村氏を通じて交流を行うことになった。ANJ は、近江八幡市、近江八幡商工会議所、滋賀県に対して、地方自治体がバイオミメティクスに取り組む事例として CEEBIOS を紹介した。そして同年 10 月、プラハで開催された第 3 回 ISO Biomimetics TC266 国際委員会の機会に 8 名の委員がサンリス市役所を訪問した際、近江八幡市長、近江八幡商工会議所会頭、滋賀県



図 1 サンリス市における会議

知事の親書をサンリス市長に手渡した。親書を通じて、サンリス市と ANJ の連携に対する期待等が伝えられた。同日設けた会議には、サンリス市長の他、サンリス副市長、CEEBIOS に参画する企業経営者、Biomimicry Europa メンバー、オワーズ (Oise) 商工会議所関係者らが参加した (図 1)。サンリス市からは CEEBIOS の最新のトピックスが、日本からは産官学連携によるバイオミメティクス推進協議会構想や、滋賀における地域の活動事例が紹介された。

更なる連携を求めて、2014 年 2 月サンリス副市長 Francis Pruche 氏が来日した機会に、ANJ が Pruche 氏を近江八幡市に招待し交流の機会を設けた。Pruche 氏からサンリス市長及びオワーズ商工会議所会頭の親書が、近江八幡市と近江八幡商工会議所に手渡され、今後の交流・連携に対する期待が伝えられた。会議には、近江八幡市、近江八幡商工会議所、滋賀県等、滋賀の関係機関から 18 名と、下村氏を代表とする ISO/TC266 Biomimetics 国内審議委員会委員 3 名が参加した (図 2)。

近江八幡市は滋賀県中央部の平野に位置し、面積 177km²人口約 8 万人、16 世紀の安土桃山時代に織田信長、豊臣秀次が築いた城下町を基礎として栄えた商業のまちである。いわゆる近江商人の発祥の地であり、その町並みが主要な観光資源となっている。市域の北東部に広がる西の湖は、ヨシ原特有の湿地生態系を示し、国の重要文化的景観に選定されたことでも知られている。



図 2 近江八幡市における会議の集合写真

一方サンリス市は、パリから北に約 50km 離れた平野に位置し、面積 24km²人口約 1 万 6 千人、12 世紀から 13 世紀に商業で栄えたまちで、現在ではその中世の街並みや歴史的建造物が観光地となっている。南にエルムノンヴィル (Ermenonville) の森、北にアラット (Alta) の森が広がる自然豊かな土地で、森の面積は総面積のおよそ半分を占める。

このような両市の歴史的・文化的背景、自然環境、さらにバイオミメティクスの推進活動等の類似点が挙げられ、産業技術や教育普及における日仏連携の可能性が討議された。

その後 2014 年 6 月、ISO/TC266 Biomimetics 国内審議委員会委員とともに、ANJ、近江八幡商工会議所、近江兄弟社高校、滋賀県立大学の関係者ら 12 名がサンリス市を訪問した。まず、CEEBIOS の拠点を視察し、施設活用計画や改装工事の進捗について説明を受けた（図 3）。最新の活動としては、フランス国内におけるバイオミメティクス従事者へのインターネット調査、企業や学生を対象にしたセミナー開催、国際連携の推進等が紹介された。この他、CEEBIOS との連携でバイオミメティクスを教育に導入している市内のアミュール・ダンビラ (Amyot D'inille) 高校（職業訓練校）を視察した。そして最後に、サンリス市と近江八幡市の関係機関（近江八幡市、近江八幡商工会議所、株式会社まっせ、滋賀職業能力開発短期大学校、ANJ）が調印した連携協力に関する協定書が作成された。

両市の具体的な連携内容についての議論はこれからである 3 度に渡る交流により、教育、観光、産業技術等における地連携の可能性が見出された。世界的にみて、地方自治体におけるバイオミメティクスの取組み事例はまだ少ない。両市が国家的な連携を通じて、バイオミメティクスによる地域振興を更推進することが期待される。



が、
域
け
際
に

References

- [1] NPO 法人アスクネイチャー・ジャパン
<http://www.asknature.jp>
- [2] CEEBIOS (Centre Européen d' Excellence en Biomimétisme de Senlis)
<http://ceebios.com>

図 3 CEEBIOS 拠点の視察

自然模倣技術・システムの可能性～環境・生命文明社会への貢献～

(環境省「平成 25 年度自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討業務」より)

株式会社富士通総研 第一コンサルティング本部 社会調査室

シニアコンサルタント 長谷川 誠

電話：03-5401-8403

E-mail：hasegawa.mak-05@jp.fujitsu.com

1. はじめに

環境省では、持続可能な社会を実現するための手段として、効率的なエネルギーの利用や資源の循環を実現している自然に学ぶ「自然模倣技術・システム」に注目している。2015 年度からの次期「環境研究・環境技術開発の推進戦略」へこれを反映させ、実社会への応用を図るために、現在、検討を進めているところである。株式会社富士通総研では、昨年度、環境省より「平成 25 年度自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討業務」を受託、有識者検討会を設置し、既存の自然模倣技術・システムの事例収集やその体系とデータベースの作成、新規事例の創出に向けた検討のほか、実社会への応用手法の検討を実施してきた。本講演では、その成果と今後の展望について発表する。

2. なぜ、今、自然模倣技術・システムか

2012 年 4 月に閣議決定された第四次環境基本計画では、目指すべき持続可能な社会を、「人の健康や生態系に対するリスクが十分に低減され、『安全』が確保されることを前提に、『低炭素』・『循環』・『自然共生』の各分野が、各主体の参加の下で統合的に達成され、健全で恵み豊かな環境が地球規模から身近な地域にわたって保全される社会」としている。

さらに、2013 年 4 月に環境省は、今後の環境政策の基本概念として「環境・生命文明社会」を掲げている。「環境・生命文明社会」は、「低炭素」、「循環」、「自然共生」を包括したコンセプトであり、その背景には、地球の環境容量の限界、すなわち、従来の大量生産・大量消費型の社会が限界に達しているという問題意識がある。環境制約の中で、いかに持続可能な社会づくりのシナリオを描くのか、我々は今、人類の歴史の中で新たな生き方を選択すべき岐路に立っているとの認識の下、自然模倣技術・システムに一つの解を見出そうとしている。

「環境・生命文明社会」は、もちろん自然模倣技術・システムだけで実現できるものではない。しかし、従来の工学のみのアプローチでは越えられなかった壁を打ち破る方策として、自然模倣技術・システムに大きな期待が寄せられている。

3. 自然模倣技術・システムの応用範囲の広がり

自然模倣技術・システムの事例としては、ロータス効果を利用した撥水性材料やゲッコーテープ等が挙げられるが、その多くは構造を模倣したものである。しかし、その応用範囲は、それに留まるものではない。自己組織化等を活用した生物の構造形成のプロセスに学ぶことで、省エネ・省資源なものづくりを創出できる可能性を秘めている。さらに、自然模倣技術・システムの応用先は、材料のみではない。例えば、生物の行動に着想を得た協調型ロボットや生物学の知見を応用した ICT インフラ、生態系にヒントを得た都市デザイン等、生物個体や生物の社会をシステムとして捉え、その社会応用を目指す研究が行われている。まずは、研究が進んでいる構造の模倣をベースに、学ぶ対象を生命現象やその背景にある原理へと広げていけば、

そのインパクトは計り知れない。

4. 実社会へ応用していくために

本事業では、実社会への応用を推進するための施策を検討するにあたり、有識者や企業の研究者へのヒアリング調査を実施している。企業の研究者からは実用化に向けた問題として、従来製品にとって代わるほどの機能性の向上や新たな市場の創出に成功した事例が少ないことや、生物の機能を応用したくてもその発現メカニズムの多くが解明されていないこと等が指摘されている。また、そのような問題を解決し、自然模倣技術・システムを社会に浸透させていくための方策として、生物学と工学等の異分野との共創を促すテーマ設定、地域での実証をモデルとした展開、産学だけでなく利用者参加型の研究開発、それらを支える仕組みとしてのデータ解析基盤や人的ネットワークの構築、バイオミメティクスの次世代イメージの形成（例えば、3D 関連技術との融合）、日本人の自然観の取り込み等が挙げられている。

5. まとめ～活用の方向性と施策～

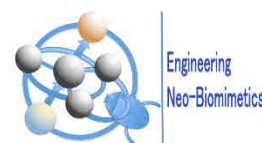
調査検討結果を踏まえて、本事業では、自然模倣技術・システムの活用の方向性として以下の5つを提示している。

- ①構造からプロセス、システムの模倣へ
- ②生物の多様性と人間の叡智を組み合わせる
- ③技術に自然観を取り込む
- ④ライフスタイルを転換する
- ⑤国際的な知的プラットフォームを構築する

また、取り組むべき施策について、短中期的な取り組みとして、①プラットフォームとしてのデータ解析基盤の整備、②地域での実証事業による成功事例の創出、③自然模倣技術・システムの研究の推進と体制構築を、長期的な取り組みとして、①需要サイド（利用者）への普及・啓発、②供給サイド（大学、企業）への普及・啓発、③自然模倣技術・システムの対象範囲・対象領域の拡大を提言している。

6. 今後に向けて

工学の論理とは異なる生命の論理、言わば「生命の知」は、産業と社会に広くパラダイムシフトをもたらすものとなるだろう。「環境・生命文明社会」と自然模倣技術・システムを世界に発信していくために、今後は、前述した施策を実行に移し、自然模倣技術・システムがいかに関「環境・生命文明社会」の実現に寄与できるのか、具体的なモデルをもって示していく必要がある。微力ではあるが、引き続き、その推進に貢献していきたい。本事業をきっかけに1人でも多くの企業の研究者の方々が、研究開発テーマの一つの選択肢として、自然模倣技術・システムを取り入れていただければ幸いである。



(4) 2014 年 7 月 31-8 月 1 日
新学術領域「生物規範工学」全体会議・
合同研究会

所属班：B01-1班

所属機関：千歳科学技術大学

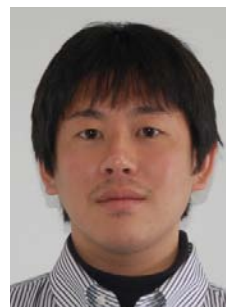
氏名：平井 悠司

所属機関住所：〒066-8655

北海道千歳市美々 7 5 8 - 6 5

e-mail：y-hirai@photon.chitose.ac.jp

研究キーワード：サメ肌、自己組織化、摩擦、しわ、ディンプル



自己組織化を利用した耐久性階層構造の作製

Preparation of Durable Hierarchical Structures by Self-organization

1. はじめに

B01-1 班(生物規範界面デザイン)では、生物の「動き」とその「制御」、変形能を有する界面凹凸形状かつ濡れた(ウェット)界面に着目、やわらかく変形可能な生物界面に見られる防汚機能や摩擦特性制御を、人工系を構築して解明することを目的としている。我々は特にサメ肌の階層構造(図1)に着目し、ポリジメチルシロキサン(PDMS)上にポリイミドの薄膜を接着剤で接着、その上に自己組織化を利用して作製されたピラー構造化膜を固定化ことで、サメ肌模倣階層構造の作製を行ってきた。しかしながら一般的な高分子の微細構造は力学的に弱く、摩擦測定は困難であった。そこで、摩擦測定に耐えうる耐久性を有する自己組織化階層構造の作製を行ったので報告する。

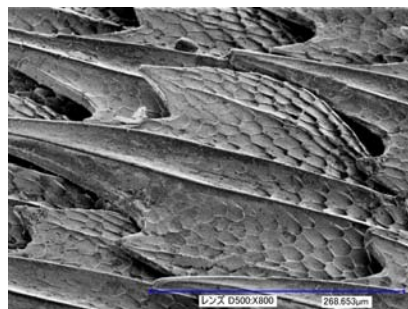


Figure 1. The photograph of a shark skin surface.

2. 耐久性サメ肌模倣表面の作製

耐久性を有するディンプル構造を作製するため、自己組織化を利用して作製されるハニカム状多孔質膜を鋳型に、PDMS でマイクロレンズアレイを作製した⁽¹⁾。また、しわ構造の元となる PDMS とポリイミドの複合材料の作製を既報⁽²⁾の通りに行った。その後ポリイミド前駆体溶液を 500 rpm で 5 秒、のち 1000 rpm で 10 秒、上記の PDMS ポリイミドフィルム複合体上にスピンコートし、PDMS のマイクロレンズアレイを接

着、室温で 2 時間、80℃で 30 分、180℃で 30 分アニーリングすることでポリイミド前駆体を熱架橋させ、ポリイミドフィルム上にポリイミドのディンプル構造を作製した。構造作製後の表面はレーザ顕微鏡にて観察を行った。

3. 作製した階層構造の表面観察

図に作製したそれぞれの段階でのサンプル表面のレーザ顕微鏡像を示す。マイクロレンズアレイの鋳型として孔径約 15 μm の空孔を有する自己組織化ハニカム状多孔質膜を利用した(図 2(a))。ハニカム状多孔質膜を利用して作製された PDMS マイクロレンズアレイはハニカム状多孔質膜を形成する際鋳型となった水滴と同様の曲率を持つ周期的なレンズ状構造が観察された(図 2(b))。またマイクロレンズアレイを鋳型としてポリイミド上に構造転写された表面には、マイクロディンプル構造の形成が確認され、ポリイミドのマイクロディンプル構造の作製に成功した(図 2(c))。その後この構造表面を圧縮したところ、周期的なしわ構造が観察され、マイクロディンプル構造も破壊されることなく残っていたことから、耐久性を有する材料でマイクロディンプル構造と周期的なしわ構造を持つ階層構造表面の作製に成功した(図 2(d,e))。ポリイミドで作製されたディンプル構造は多少の力で表面を擦っても微細構造が破壊されなかったことから、今後は摩擦力を測定していく予定である。

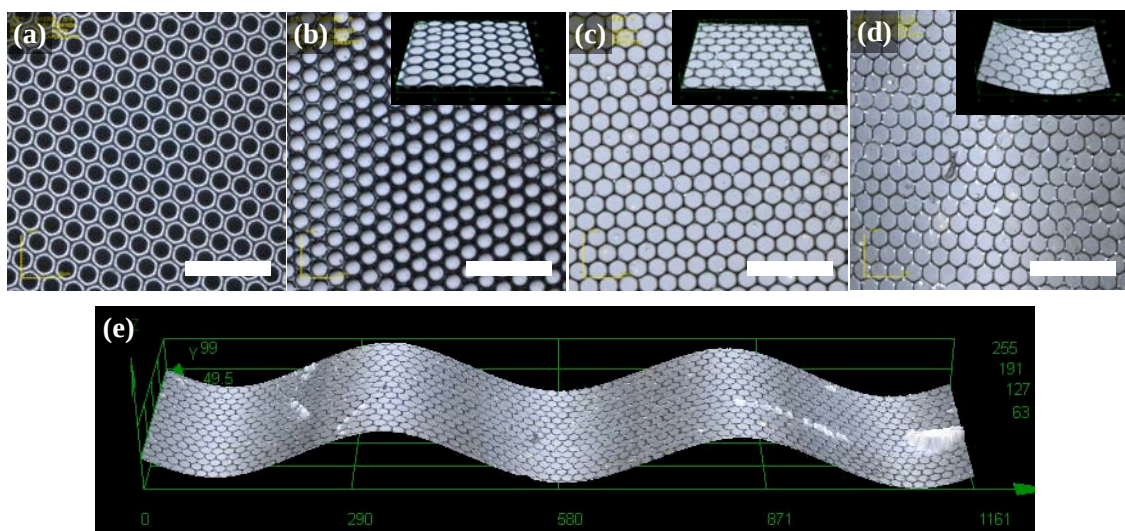


Figure 2. Laser microscope images of (a) honeycomb-patterned films, (b) PDMS microlens arrays, (c) before and (d,e) after compress the surfaces of hierarchical structures. (bars; 80 μm)

参考文献

- (1) 平井悠司、藪浩、海道昌孝、鈴木厚、下村政嗣, 高分子論文集, **2013**, 70(5), 193-198
- (2) Kosuke Suzuki, Yuji Hirai, and Takuya Ohzono, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2014**, 6(13), 10121-10131

所属班：B01-1

所属機関：工学院大学 工学部 応用化学科

氏名：小林 元康

所属機関住所：〒192-0015東京都八王子市中野町2665-1

e-mail：motokoba@cc.kogakuin.ac.jp

研究キーワード：高分子合成、表面改質、濡れ、接着、摩擦



カテコール化合物を利用した高分子材料の表面改質 Surface modification of polymeric materials by catechol derivatives

1. はじめに

イガイやムラサキガイなどの貝類は足糸の先端から接着タンパクを分泌し岩礁などに付着している。この接着タンパクを構成するアミノ酸に 3,4-ジヒドロキシフェニル-L-アラニン(DOPA)が含まれており、これが酸化ケイ素をはじめとする金属酸化物などキレートを形成するとともに、酸化カップリング反応を経て架橋することで強固な接着層を形成することが知られている。MessersmithやDemingらはこの分子と類似の構造を有するドーパミンを用いて様々な材料表面の改質することができることを報告している²⁾。本研究班ではポリイミド薄膜やポリビニルアルコール(PVA)ゲルによる可変微細構造の形成を検討しているが、これら高分子材料表面の化学的改質が課題であった。そこで、本研究では高分子材料表面に強固に付着し表面特性を制御可能なドーパミン誘導体を合成し、さらに表面開始重合法と組み合わせることでポリマーブラシからなるナノ薄膜の調製を試みた。

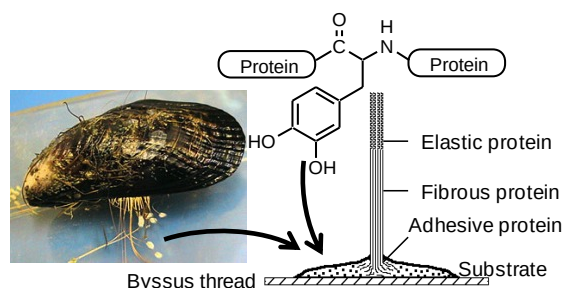
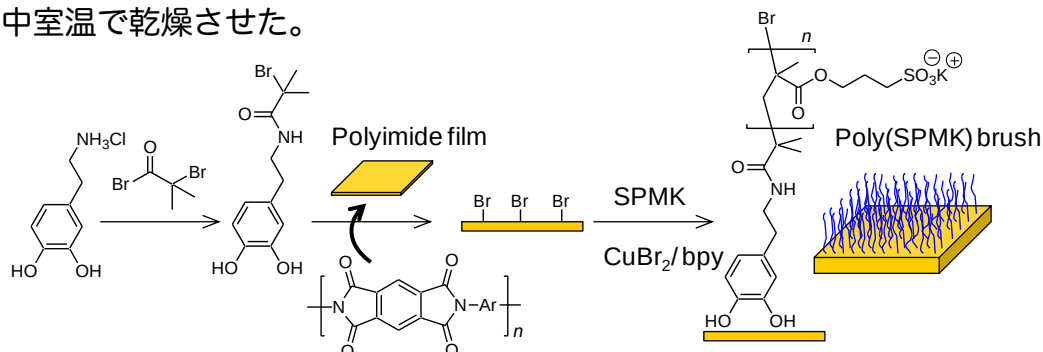


Figure 1. Byssus thread of mussel and adhesive protein containing 3,4-dihydroxyphenyl-L-alanine moiety¹⁾

2. 実験

Scheme 1 のようにドーパミン誘導体を合成し、0.5%水溶液を調製した。これに tris バッファーと NaOH を加えて pH = 8.5 に調製し、ポリイミド（カブ

トン) フィルムを室温 6 時間浸漬した。これを真空下 100 °C にて 3 時間乾燥させた。この薄膜を反応容器に入れ、 CuBr_2 、2,2'-ビピリジル、メタクリル酸 3-スルホプロピルカリウム塩(SPMK)、 H_2O 、アルコールビン酸を順次加えて室温で 3 時間静置した。得られた薄膜を水およびエチレングリコールで洗浄し、大気中室温で乾燥させた。



Scheme 1. Surface modification of polyimide film by surface-grafting of super hydrophilic poly(SPMK) from surface-immobilized dopamine-containing alkylbromide.

3. 結果と考察

塩基性水溶液条件下においてドーパミン誘導体をフィルム表面に吸着させ、架橋させることでポリイミドフィルム上に臭化アルキル基を固定化した。さらに表面開始原子移動ラジカル重合を行い poly(SPMK)を生長させた。膜厚、生成ポリマーの分子量は未測定であるが、フィルムと同時に同様の反応処理を行ったシリコン基板には膜厚 50-60 nm の poly(SPMK)ブラシが形成されていることを確認している。

得られた基板の対水静的接触角を測定した(Figure 2)。未処理のフィルムの接触角は 52°であったが、poly(SPMK)をグラフトした後は 8°以下まで低下し表面が親水化したことが明らかである。また、同様の表面改質が PVA ゲル表面でも実行可能であることを確認した。poly(SPMK)をグラフトした表面は優れた濡れ性を示し³⁾、水中で極めて低い摩擦係数を示す⁴⁾ことが知られていることから、ポリイミドフィルム表面においても水潤滑が実現し低摩擦を示すことが期待される。

参考文献

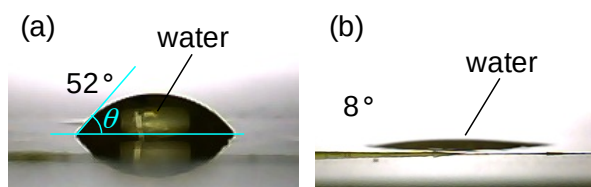


Figure 2. Water contact angle on Kapton® polyimide film (a) before (untreated film) and (b) after surface- grafting of poly(SPMK)

- (1) Deming, T. J. *Curr. Opin. Chem. Biol.* **1999**, *3*, 100-105.
- (2) Fan, X.; Lin, L.; Messersmith, P. B. *Biomacromolecules* **2006**, *7*, 2443-2448.
- (3) Kobayashi, M.; Terayama, Y.; Yamaguchi, H.; Terada, M.; Murakami, D.; Ishihara, K.; Takahara, A. *Langmuir* **2012**, *28*, 7212-7222.
- (4) Kobayashi, M.; Terada, M.; Takahara, A. *RSC Faraday Discussions* **2012**, *156*, 403-412.

所属班：B01-2班

所属機関：北海道大学大学院理学研究院

氏名：久保 英夫

所属機関住所：〒060-0810 札幌市北区北10条西8丁目

e-mail：kubo@math.sci.hokudai.ac.jp

研究キーワード：モスアイ効果、乱れた構造、頑強性、尺度
不干渉性、自己組織化



乱れた構造が創る頑強な機能について －尺度不干渉性の観点から

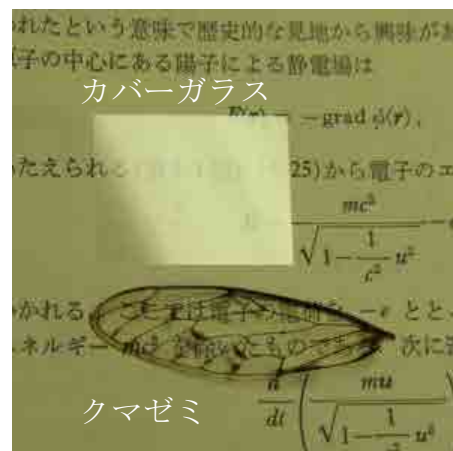
Robustness of functions arising from an irregular structure - from the view point of noninterference among scales

本稿は、吉岡伸也先生を中心に B01-2 班で進められている研究内容に基づくものであることを始めにお断りしておきます。

1. 乱れた構造と頑強性

生物はその体表表面にサブセルラーサイズの微細構造を様々にデザインし、多機能性を獲得している。例えば、モスアイが高いアスペクト比（表面構造の深さ）を持つ突起構造を規則的に配置することにより、高性能な反射防止効果を有していることは良く知られている。しかしながら、セミの翅にも規則性が乱れているものの類似の構造が観察され、しかもそれが十分な反射防止効果などの機能を持っていることがわかってきた。

右図は、カバーガラスが光を強く反射するのに対して、クマゼミの翅は配列の乱れにもかかわらず優れた透過性を示すことを如実に示している。



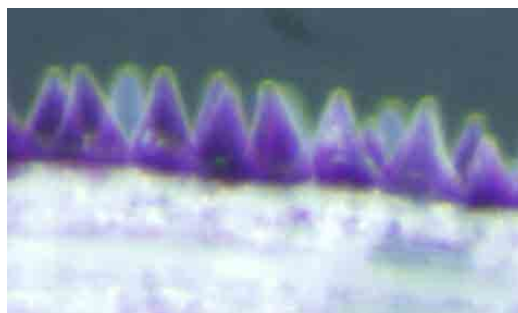
このように多少の乱れがあっても必要な機能を発現できるのであれば、トップダウン型の情報処理に頼らず、自己組織化を利用することが生物の材料設計の指針となっていると思われる。

ただし、モスアイと較べてセミの翅の構造が乱れているのは、自己組織化のプロセスの

影響というよりも、折りたたまれた状況で形成されることが原因ではないかと考えられる。

2. スケール変化と頑強性

ビオラの花弁表面にも数十ミクロンサイズの突起構造がある。この構造も反射防止効果を有しており、花弁の色をより鮮やかなものとしている。つまり、所謂、モスアイ効果はサブセルラーサイズに特有な現象ではなく、スケール変化に対して頑強な性質であることが見出された。

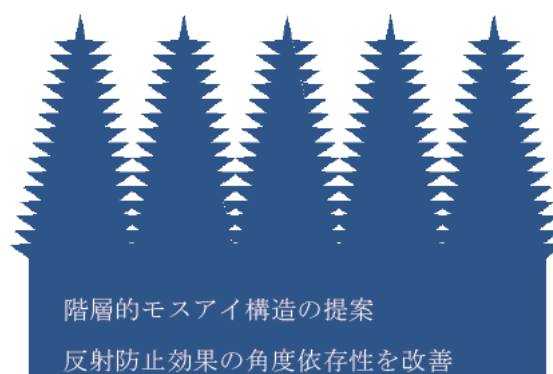


その光学的なメカニズムは、右図のような光の幾何光学近似による描像において、反射が繰り返されることにより、反射光の強度がどんどん小さくなっていくことにある。その効果は、本質的にはアスペクト比により決まるが、反射波の強度の角度依存性は突起のサイズや間隔をパラメータに持つ。しかし、この幾何光学的反射防止構造とモスアイ構造をフラクタル様に組み合わせた下図のような階層的構造は、単体の幾何光学的反射防止構造がもつ角度依存性を改善することが検証されている。



3. 尺度不干渉性について

異なるスケール、例えば、異なる波長間に相互作用が生じるとき、尺度干渉性があるという。蝶の羽ばたきが地球の裏側の天候を左右するというバタフライ効果は微小なスケールと大域的なスケールが相互作用を起こすことに起因するので、尺度干渉の典型例である。一方、対象となる系が尺度不干渉性をもつとき、ある入力に対する出力を調べるには、入力を異なるスケ



ールに分解し、それぞれの出力を求めてから、それらの総和をとれば良い。上に挙げた例からモスアイ効果は構造のサイズによらず発現することがわかるので、モスアイ構造は少なくとも自然光の強度の範囲では尺度不干渉性をもつと言える。それ故、セミの翅の例のように、突起の間隔が多少乱れても、それに起因する擾乱が反射防止効果を弱めるようなことはなく、また異なるサイズの構造を合成しても危険が生じないのだと考えられる。しかし、形態発生のプロセスにおいて、均一なアスペクト比を持つ突起構造がどのような自己組織化現象によってもたらされるのかは興味深い未解決問題である。

所属班：B01-2

所属機関：名古屋工業大学若手研究イノベータ養成センター

氏名：石井 大佑

所属機関住所：〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

e-mail：ishii.daisuke@nitech.ac.jp

研究キーワード：Max 5 ワードでお願いします。



自己組織化形成プロセスによるタマムシ模倣表面の創製

Development of Biomimetic Surfaces of a Jewel Beetle by a Self-Organization Process

1. はじめに

B01-2 班では、生物の表面構造を規範として材料設計を具現化し、省エネルギー生産プロセスの開発を目的としている。今回は、生物表面の自己組織的な形成プロセスの解明、および、自己組織化により作製した規則構造に由来する構造色の発現を検討した結果を報告する。

2. 生物表面構造の形成プロセスである自己組織化による構造色の作製

研究期間内に、タマムシの構造色の発現機構を明らかにし、その機構を規範とした模倣表面を自己組織化プロセスにより作製する。最終的にはタマムシのシグナルを光学的に操作した害虫駆除機構へと展開する。これまでに、ヤマトタマムシの表面構造を解析すると、クチクラの表角皮(epicuticle)がもつナノ構造の多層膜干渉によって発色していることがわかった。緑を呈する部分(図1 A、C)は、赤を呈する部分(図1 B、D)の層の厚さよりも薄い。この構造色は、ヤマトタマムシ間での種内信号であり、雌雄の弁別ではなく同種個体の認識として用いられていることを行動学的に確認した。同様の構造色をもつミドリフトタマムシを規範とし、オパール粒子の自己組織化を利用して模倣表面を作製することに成功した。具体的には、タマムシ実物をマスターピースとし、PDMS モールドを介してカーボン粒子含有エポキシ樹脂のレプリカを作製した後、コロイド粒子懸濁液に浸漬して自己組織的に湾曲表面にオパール被覆層を形成させた(図1 E、F)。分光装置で光学特性を評価すると緑部と紫外部に同じような反射ピークをもつスペクトルを忠実に再現でき(図1 G)、ミドリフトタマムシの epicuticle の発色の仕組みを模倣できていた。鞘翅の断面を透過型電子顕微鏡観察するとオパール粒子の層状構造が観

察でき(図1 H)、本手法で構造色を精密に模倣できることを確認した。今後は、タマムシ模倣レプリカを用いて、タマムシのシグナルを光学的に操作し、害虫駆除の可能性を調査し、構造の最適化を図る。

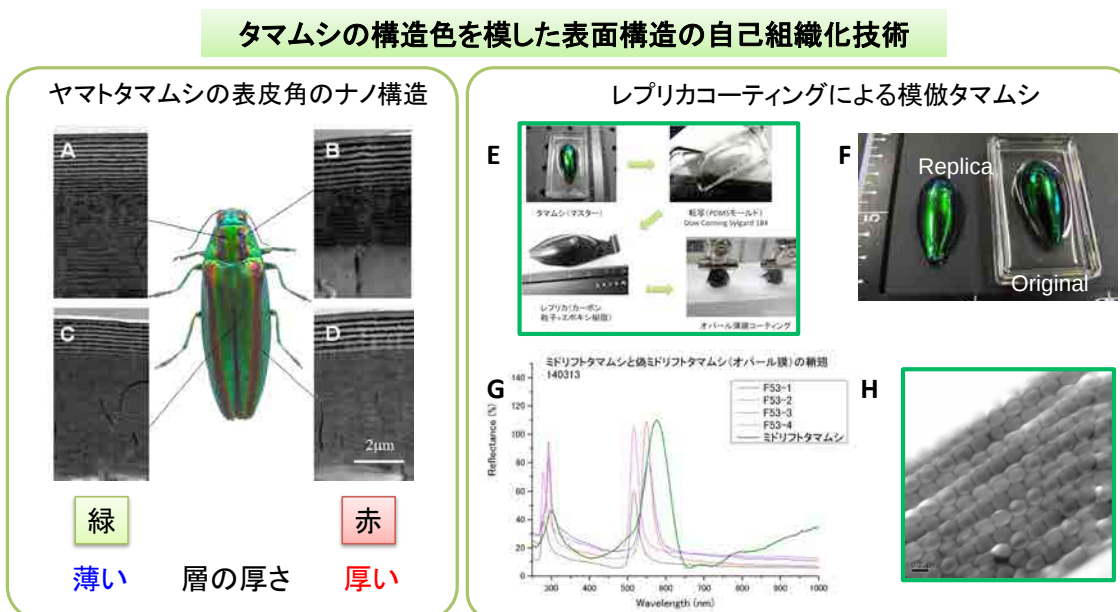


Fig.1 Development of biomimetic surfaces of a Jewel Beetle by a self-organization process.

3. 生物のサブセルラーサイズ構造の自己組織化の解明

研究期間内に、昆虫の複眼表面構造と脚先の毛状構造(SETA)の形成過程を中心に、クチクラのサブセルラーサイズ構造形成過程を明らかにし、今後の材料設計やプロセスの転換への指針とする。現在までに、昆虫のクチクラ形成に関する発生生物学的解析のモデル生物として、遺伝子操作可能なキイロショウジョウバエを研究対象の中心に据え、複眼表面構造と SETA の自己組織化形成機構を解析している。野生型のショウジョウバエはおよそ 800 個の個眼からなる複眼を左右に一個ずつもち、各個眼は角膜レンズ表面に固有のニップル構造パターンをもつ。特定の遺伝子の働き方を変化させると大きなニップルや波形のニップルパターンに表面構造が変化する。このように遺伝子の働きを変化させたときに生ずるニップルパターンの変化を、発生ステージごとに経時的に観察を行い、超微細構造の自己組織化がどのような仕組みで決定されるのか、サブセルラーサイズ構造からナノ構造までの形態変化を追跡している。今後は、自己組織化と超微細構造の関連性の詳細を明らかにするために、その理学的背景を推測し、robustnessをもった生物のものづくりを規範とした自己組織化による工学的超微細構造形成技術の指針として提案を目指す。また、B01-1 班との班間連携により、マイクロリンクルの自己組織的形成機構との関連性を検討する。

所属班：A01班

所属機関：北海道大学大学院情報科学研究科

氏名：長谷山美紀

所属機関住所：〒060-0814北海道札幌市北区北14条西
9

e-mail：miki@ist.hokudai.ac.jp

研究キーワード：バイオミメティクス・データ検索



バイオミメティクス・データ検索基盤の実現と技術創出

Realization of Biomimetics Data Retrieval Platform and Technological Innovation

1. はじめに

バイオミメティクスは、生物学と工学などの異なる研究分野が連携し、新しい技術を創出する科学技術である。技術創出の加速を目指し、異なる分野の知識共有を支援するバイオミメティクス・データ検索技術の開発が開始され、2年が経過した。発想支援型の画像検索理論⁽¹⁾⁻⁽³⁾に基づき、大量の画像をその類似性に基づき効果的に表示することで、利用者に望む情報を獲得するための気づきを与える検索基盤の実現が試みられている。本稿では、試作システムを紹介し、実際に生物学者により撮像された顕微鏡像を投入して得られた検索結果を分析する。

2. バイオミメティクス・データ検索

バイオミメティクスの異分野連携を支援するバイオミメティクス・データ検索の試作システムが、発想支援型検索⁽¹⁾⁻⁽³⁾を基にして開発された。システムには、昆虫、鳥類、魚類のSEM画像データベースを準備した。このシステムを利用する事で、データを保持する研究者が自身のデータを登録し、他者のデータと融合したデータベースの閲覧が可能となる。また、データを保持する研究者が、自身の画像を質問画像としてデータベースを検索する機能を備え、画像による画像の検索が可能である。

この検索機能を用いることで、知識が少ない異分野の情報を獲得することが可能となる。実際の利用では、産業界に存在する外部に開示が困難な画像データを質問として、公開された学術データを検索するための機能として有用である。具体的に、材料画像を質問画像として生物画像データベースを検索した結果を図に示す。図より、生物・材料

など全く異なる分野のものであっても、互いに表面構造が類似する画像であれば、検索が可能となることが理解できる。

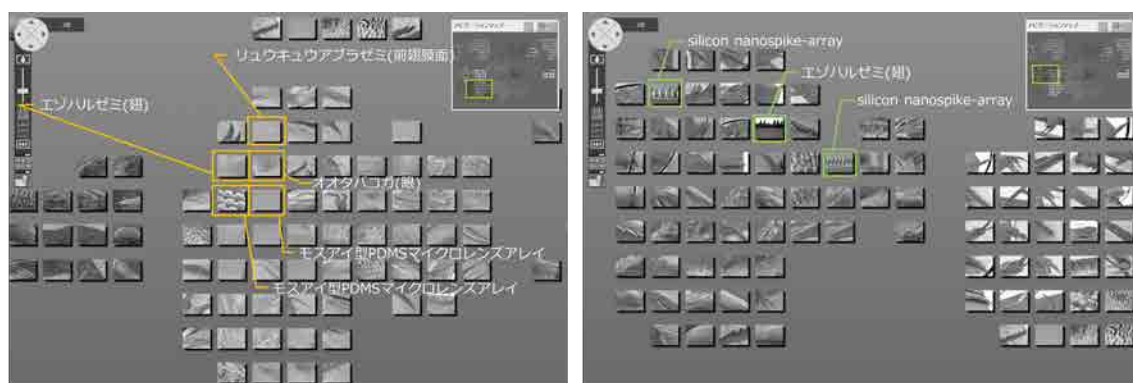
以上のように、バイオミメティクス・データ検索システムを利用することで、生物と材料という全く別の分野であっても画像の類似性で関連付けができることが示された。この例は、異分野の知識共有の可能性と新たな技術創出を示唆するものとする。生物学に蓄積されたデータと工学のデータを有機的に連携することで材料開発に新技術の創出が期待できる。

3. むすび

異なる研究分野に蓄積された大量のデータの背景には、分野に固有の貴重な知識が存在する。社会が解決を望む問題は複雑さを増し、問題の所在さえ見え難い現状で、個別の研究分野に知識が蓄積するだけでは、解決の方策を見出すには限界がある。バイオミメティクスは、現在の社会が抱える問題を解決する試みと捉えることができる。知識の蓄積としての異分野データベースの連携を通して、産業の創出を支援する産学連携プラットフォームの実現が望まれる。

参考文献

- (1) 長谷山 美紀, “画像・映像意味理解の現状と検索インタフェース,” 電子情報通信学会誌, vol. 93, no. 9, pp. 764-769, 2010.
- (2) Miki Haseyama, Takahiro Ogawa, and Nobuyuki Yagi, “A Review of Video Retrieval Based on Image and Video Semantic Understanding,” ITE Transactions on Media Technology and Applications, vol. 1, no. 1, pp. 2-9, 2013.
- (3) Miki Haseyama and Takahiro Ogawa, “Trial Realization of Human-Centered Multimedia Navigation for Video Retrieval,” International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 29, no. 2, pp. 96-109, 2013.



(a) オオタバコガのモスアイ構造、エゾハルゼミの翅、リュウキュウアブラゼミ前翅膜面の近傍に、モスアイ型PDMSマイクロレンズアレイの画像が存在する

(b) エゾハルゼミの翅の断面画像の近傍にsilicon nanospike-arrayが存在する

図 試作システムの検索結果と分析

所属班：A班

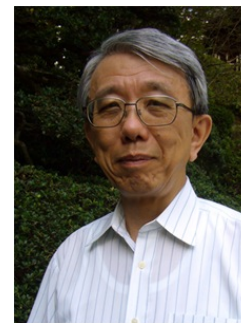
所属機関：国立科学博物館

氏名：松浦 啓一

所属機関住所：〒305-0005 茨城県つくば市天久保4-1-1

e-mail：matsuura@kahaku.go.jp

研究キーワード：画像データベース、表面構造、鳥類、魚類、
昆虫



昆虫、鳥類及び魚類の表面構造の画像を収録したデータベース 構築

Progress Report on Building an Image Database of Surface Structures of Insects, Birds and Fishes

1. はじめに

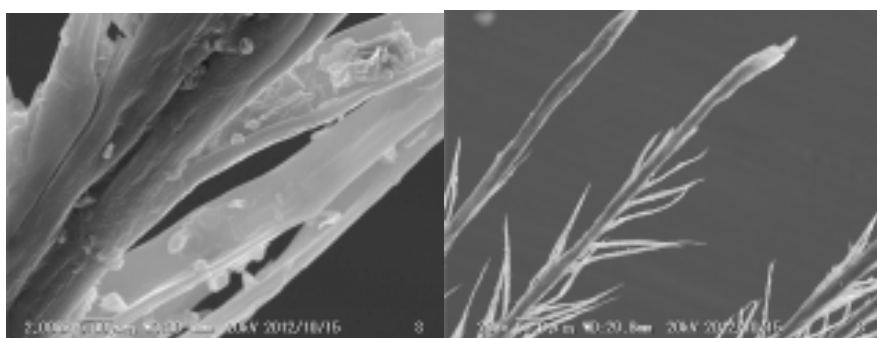
A 班には 3 つの生物系小班がある。野村小班（国立科学博物館）は昆虫、山崎小班（山階鳥類研究所）は鳥類、そして篠原小班（国立科学博物館）は魚類のデータ作成を担当している。生物系小班は動物の表面構造を SEM やデジタルマイクロスコープによって撮影し、画像データベース担当の長谷山小班に提供している。また、各動物群の適応に関するテキストデータを作成し、オントロジー担当の溝口小班に提供している。生物系小班の収集した画像に基づいて画像データベースが構築され、オントロジーデータベースも構築されつつある。しかしながら、現在まで生物系研究者と工学系研究者の連携に進展は見られていない。生物系小班は工学系研究者に連携を呼びかけているが、目立った反応がない。この点を改善しなければ新学術領域の研究目標である異分野連携は達成できないであろう。

2. 生物系小班の 2013 年度末までの活動

データベースに格納する画像の件数は当初 5 カ年で 10,000 件を目指していたが、機材と人材の確保に成功した結果、計画をはるかに上回る画像を収集できた。画像件数は現時点ですでに約 12,000 件を超えている。内訳は、SEM 画像約 170 種 10,500 件（昆虫 約 60 種 8,000 件、鳥類 約 40 種 1,000 件、魚類 約 70 種 1,500 件）、デジタルマイクロスコープ画像約 60 種 500 件（魚類のみ）、X 線 CT 画像約 200 種 600 件（鳥類のみ）、マルチスペクトル画像約 200 種 600 件（鳥類のみ）である。

生物の適応についてまとめたテキストファイルの整備については、種レベルおよび科レベルの分類群を対象に作業を進め、これまでに約 210 分類群（昆虫 約 60 分類群、鳥類 約 80 分類群、魚類 約 70 分類群）の処理を終え、ほぼ当初計画通りである。

人材育成・普及啓発活動・班間連携にも取り組み、野村小班は国立科学博物館において研究集会「昆虫の飛翔に関するワークショップ」を開催し（2013 年度）、山崎小班は収集した X 線 CT 画像を用い、B01-5 班と共同で鳥類の運動に関する博物館展示用コンテンツを開発、我孫子市鳥の博物館、水戸市立博物館での普及啓発活動に活用した（2013 年度）。篠原小班は静岡県駿河湾（2012 年度）、高知県土佐湾（2013 年度）において魚類試料の採集を伴う講習会・研究集会を B 班と連携して開催した。



SEM images of feather of *Nipponia nippon*.

3. 今後の計画

生物の適応を種レベルまたは科レベルでまとめたテキストデータについては、各年度 100 分類群（昆虫 30 分類群、鳥類 40 分類群、魚類 30 分類群）について作成する。画像データ（SEM 画像・デジタルマイクロスコープ画像・X 線 CT 画像・マルチスペクトル画像）については、各年度 2,400 件（昆虫 1,500 件、鳥類 500 件、魚類 400 件）の作成を目標に据え、以下の点に留意する。(1) B 班で新開発されたナノスーツ法（試料からの気体・液体の流出を防ぐ SEM 画像撮影技術）を取り入れ、人為的変形の少ない、自然状態の形態を観察できる高品位の SEM 画像を集める。(2) B 班と協議のうえ、興味深い発見が期待できる構造（例えばモスアイ構造、吸盤、棘など）を持つ分類群を選定し、重点的に調べる。また、生物系 3 小班は、構築したデータベースを活用し、昆虫・鳥類・魚類の形態的特徴を比較・検討し、機能と進化の解明につながる情報を整理する。

参考文献

(1) Nomura, S; H. Kamezawa, H.; Arai, S. Elytra, Tokyo, new series, 2013, 3, 31-43.

(2) Nakae, M.; Sasaki, K.; Shinohara, G.; Okada, T.; K. Matsuura, K. 2014, J. Morphology, 275, 217-229.

(3) 野村周平, 2014, PEN, 4, 12-18.

所属班：C-01

所属機関：地球村研究室

氏名：石田 秀輝

所属機関住所：〒891-9222 鹿児島県大島郡知名町徳時 910

e-mail：emile.h.ishida@gmail.com

キーワード：持続可能な社会、ライフスタイル、オントロジー工学



持続可能な社会に求められるテクノロジー開発手法の創成に向けて

Development of the Technology for the Creation of Sustainable Society

1. はじめに

1992 年、ブラジル/リオ・デ・ジャネイロで開催された『環境と開発に関する国際連合会議』（地球サミット）には、172 カ国からのべ 4 万人を超える人々が集まり、国際連合の史上最大規模の会議となるとともに、持続可能な開発を旨とする『アジェンダ 21』が採択され、世界に大きな影響を与えた。それから 20 年を経た 2002 年 6 月、再度リオで地球サミット（リオ+20）が開催されたが、環境と成長の両立が重要との抽象的な方向は採択されたものの、それに対する具体的な施策や数値は何も決まらず閉幕した。この 20 年、先進国は持続可能な社会を創るために多くの努力をしてきた、しかし、現実理想からますます乖離し、このままでは 2030 年頃、文明崩壊の引き金を我々自らの手で引くかもしれない瀬戸際にあることも事実である。

では、環境と成長の両立に必要な要件とは何か？ そこに必要なテクノロジーが具備すべき要件とは何か？ 今あらためて考え、定義する必要がある。

2. 環境と成長の両立に必要な要件⁽¹⁻²⁾

少なくとも近代型の成長はエネルギーや資源の消費を増大する発散型の成長であった。また、エコ・テクノロジーの市場投入が環境劣化に大きくは貢献できないことも明らかになっている今、求められているのは、厳しい地球環境制約の中での成長であり、過去に経験したことのない成長の形である (Fig.1)。

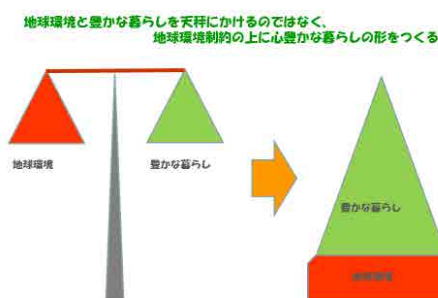


Fig.1 Thinking approach

3. ライフスタイル・オリエンテッド・アプローチ⁽¹⁻²⁾

環境と成長の両立のためには、1) 厳しい環境制約の中での心豊かなライフスタイルを(バックキャスト思考-Fig1 右側の思考で)考える。2) ライフスタイルに必要なテクノロジー要素を抽出する。3) 完璧な循環をもっとも小さなエネルギーで駆動する自然の中にその要素を見つけ、4) サステイナブルのフィルターを通して、具体的なテクノロジーとしてリ・デザインする必要がある (Fig.2)。

例えば、トンボの風力発電機開発例では、Fig.3 のような環境制約下で心豊かなライフスタイルをイメージし、そこからテクノロジー要素を抽出<低速で滑空可能>、自然の中にその素材を探す<トンボの翅>。トンボはレイノルズ数 10^{-3} 程度の領域で飛翔しており、この領域では、トンボの翅の凸凹

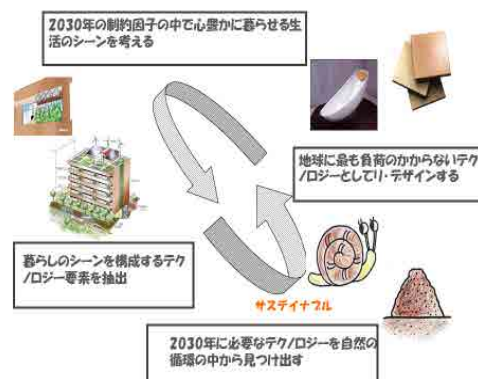


Fig.2 Tech. creation system

が小さな渦を創り、それが粘性の高い空気をベルトコンベアに載せるように後方に運んでいることが明らかになった (Fig.4)。この原理を用いて開発された発電機 (Fig.5) は、従来では達成されなかった風速 1m/s でも 18% の高効率性能を示す (Fig.6)。



Fig.4 Airflow around the wing



Fig.5 Micro wind generator

4. ライフスタイル・オリエンテッド・アプローチの展開

ライフスタイル・オリエンテッド・アプローチが、従来のテクノロジー創出手法と全く異なる結果を導き出すことは明らかとなったが、これを一般解とするためには、いくつかの問題を解決しない

1) ライフスタイルからテクノロジー要素を抽出する

ライフスタイルイメージを一般的には 300-400 字の文章にするが、そのライフスタイルイメージは一般に抽象的なものが多く、テクノロジー要素の抽出は研究者のセンスに負うところが多かった。

そのため、オントロジー工学を導入して、ライフスタイルの行為分解木を用いる方法を検討している(世界初)

(Fig 7)。すでに、10 個程度の行為分解木が出来ておりライフスタイルを分解することにより、それを構成するテクノロジー要素、心の豊かさに繋がるテクノロジー要素や行為などが表現できることが明らかとなっている⁽³⁾。さらに 50 個程度の分解木を作成し、環境制約下で心豊かな暮らしを考えるためのテクノロジー要素や行為がどの程度存在し、共通するものがどの程度の頻度で現れるのか明らかにしたい。

2) テクノロジー要素のリ・デザイン

最終的には、テクノロジー要素の具体的な形を創出する必要があるが、これには Bio-Triz などの手法導入を考えている。

参考文献

- (1)石田秀輝・古川柳蔵、地下資源文明から生命文明へ、東北大学出版会 2014
- (2)Emile H. Ishida, Nature Technology, Springer 2013
- (3)Yuko Suto, Shoko Fuji, Ryuzo Furukawa, Riichiro Mizoguchi, Emile H. Ishida, Development of matching process against lifestyle and technology- Specification of lifestyle -, Joint International Symposium on Nature-inspired Technology (ISNIT) 2014 and Engineering Neo-Biomimetics V, Sapporo, Japan, February 12 - 15, 2014.

＜小さな小さな風の発電機＞

2030年、昔の様に石油を使って電気を創ることは難しくなりました。原子力発電も2011年の福島第一原発の事故をきっかけに、先進国では運転がほとんど止まりました。途上国でも放射性廃棄物の処理など、先進国に頼っていた分を自分達で処理するにはあまりにコストが掛り、ほとんどの国でその使用をあきらめているようです。その代わり、薄いいけれど大量にある自然エネルギーをうまく使う知恵比べが始まりました。エネルギーの使い方も随分変わってきました。今では、庭先でくるくる回る小さな発電機が子供たちの憧れの的なんです。何故って、自分で貯めた電気は自分で使うことが出来るからです。昨日貯めた電気ですら少しだけゲームをしました。今日貯める電気は、本当はゲームに使いたいけれど御機嫌のおばあちゃんの補聴器の電気が無くなりかけたと今朝聞いたので、おばあちゃんにプレゼントしようと思っています。明日は、少しでもさん風が吹くといいなあ...そんなことを思いながらくるくる回る発電機を眺めるのがとても幸せです。

Fig.3 Example of the life-style

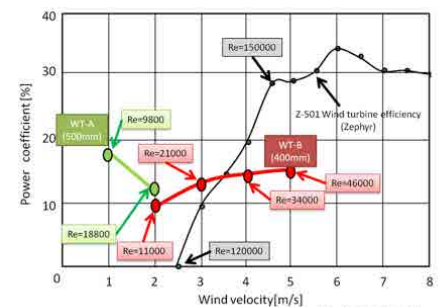


Fig.6 Performance curves of micro wind and already on the market generator

オントロジー工学の導入

「木造電柱は総合小型発電機のハブ」の行為分解木

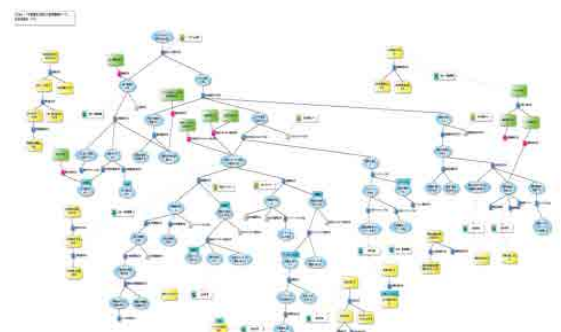


Fig.7 Behavioral decomposition tree

所属班：C-01

所属機関：新潟大学工学部

氏名：山内 健

所属機関住所：〒950-2181新潟市西区五十嵐2の町8050

e-mail：yamauchi@gs.niigata-u.ac.jp

研究キーワード：バイオTRIZデータベース、
マイクロバイオリアクター、ポリビニルアルコールゲル



生物機能を工学技術に転用するための支援方法 ーバイオ TRIZ データベースー

Design of new functional materials by bio-TRIZ data base

1. はじめに

近年、高効率・高性能な生物機能を材料設計に取り入れる生物模倣工学の研究が活発に進められている。しかしながら、その応用範囲は広く、ケースバイケースでの材料設計が主となっており、生物技術の体系化は非常に困難である。さらに国際標準機構（ISO）ではバイオミメティックスに関する規定について検討されており、国際基準でのバイオミメティック材料の創出が求められている。

そこで本研究では、材料設計のアイデア創出法として知られる TRIZ（トゥリーズ）に着目して、効果的に生物機能を材料工学に移転する方法について検討した。この手法はバイオ TRIZ と呼ばれる問題解決法で、これまでの工学的なアプローチに 150 万種以上も存在するといわれる生物の仕組みを取り入れて、問題解決のヒントとして提案するという発想である。我々は、この手法を確立することを目的に、工学的な技術矛盾を解決するために有用となる、生物の仕組みを提供するデータベース（バイオ TRIZ データベース）の構築を検討している。

ここではその一例として、マイクロバイオリアクターの新たな設計・開発を取り上げて、持続可能な社会の構築における新たなモノづくりの可能性について説明する。

2. バイオ TRIZ による問題解決

バイオ TRIZ による問題解決について、マイクロバイオリアクターの反応速度の向上について説明する。

近年、小型化、高性能化、省エネルギー化の観点から抗体や酵素といった生体機能性物質を担持したマイクロバイオリアクターやマイクロバイオチップの研究が進展している。

しかしながらその多くは高分子樹脂、活性炭、金属酸化物といったドライな流路表面または流路内に生体機能性物質を固定化、充填するものが多く、反応速度を高めようとすると、材料の質量および形状、システムの圧力などの阻害要素が発生する。バイオ TRIZ データベースを活用することで、この工学的な矛盾を解決する方法として小腸の柔突起を模倣した材料の有用性が提示された。そこで、実際に新規な高分子ゲルバイオリアクターの開発を検討した¹⁾。

具体的にはバイオ TRIZ を導入した材料設計に基づいて、多孔質シリコンウェハー上で、ポリビニルアルコール (PVA) 水溶液を凍結と融解を繰り返すことにより、微小な突起構造を有する PVA ゲルを作製し、この微細構造を有する PVA ゲル中に酵素を包括固定し、酵素反応場としての評価を行った。酵素を固定化した PVA ゲルに突起構造を付与することで、絨毛のような生体環境を *in vitro* で再現することができ、高効率な生化学反応デバイスとしての応用が可能であることが分かった。

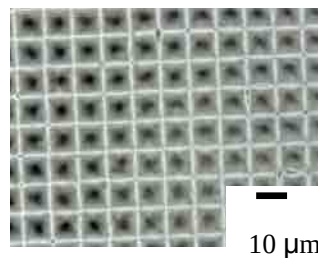


Figure 1 Surface structure of a gel with arrayed micro rods.



Figure 2 Micro-bioreactor of a gel with arrayed micro rods.

3. バイオミメティック材料の開発におけるバイオ TRIZ の活用

バイオミメティック材料の開発においては、①既存技術・材料から問題を抽出、②問題解決のための生物機能を探索、③探索した生物機能の原理を抽出・一般化、④材料を創製して最適化を検討、という過程を経る必要がある。バイオ TRIZ データベースによる検索の特長は、過程①～③のを経ながら生物機能を工学に移転するためのヒントを提供できる点にある。

以上のとおり、厳しい環境制約の中での心豊かなライフスタイルを築くために、バイオ TRIZ は問題解決ツールとして役立ち、新たなテクノロジー要素の創出を可能にすると期待できる。

参考文献

(1)西山 聖, 横田裕貴, 山内 健, 坪川紀夫, 小林秀敏, 深見一弘, 作花哲夫, 尾形

幸生, 高分子論文集, **2013**, 70(7), 331-336.

所属班：B01-5班 生物規範メカニクス・システム

所属機関：千葉大学工学研究科

氏名：劉浩

所属機関住所：〒263-8522千葉市稲毛区弥生町1-33

e-mail：hliu@faculty.chiba-u.jp

研究キーワード：生物飛行システム, バイオメカニクス,
力学シミュレーション, バイオミメティクス



スズメ蛾とハチドリの柔軟翼が同じ法則に従う変形で空気力学性能を向上するのか？

B01-5 班では、生物規範メカニクス・システムの一環として生物飛行の組織・器官—個体スケールの階層間連結に基づく生物飛行メカニクス・システムの学理探求を行うとともに、生物規範型飛行ロボットの設計指針の確立と自律型昆虫型飛翔バイオロボットの実現を目指している。これまでは、昆虫羽ばたき飛行の動力学・流体力学・材料力学・飛行制御を統合した生物飛行統合力学シミュレータを構築するとともに、生物飛行、生物規範型ロボット及びバイオミメティクス流体機械（風車ローター）を実験検証・原理確立する上ことが可能な世界トップレベルの回流型超低速風洞とステリオ DPIV 流体計測システムを整備した（図1, 劉・田中 G）。大規模なマルチメカニクス連成解析、高速度ビデオ撮影及び風洞実験により、蛾やハチドリは精巧な構造により柔軟翼の受動的な変形（曲げ、ねじり及びキャンバー）が効率的に空気力を発生させることを明らかにした。これらの柔軟翼の慣性力と流体力の力学場による受動的な変形が個体サイズに依存する多様性をも示唆する。さらにこのような生物柔軟翼の受動的変形機能を規範とした、自由に翼変形を制御可能な柔軟伸縮皺フィルム人工翼の開発に成功し羽ばたき飛行ロボットへの応用を目指している。一方昆虫羽ばたき飛行の神経・骨格系(安藤 G)について、羽ばたき運動中の外骨格の変形を、対応する飛翔筋活動、羽ばたき運動計測と組み合わせ、昆虫の外骨格の挙動解析を中心に行った。また翅の損傷に対する補償メカニズムを神経・筋肉系、および外骨格の構造の特性の両面から明らかにするために、神経系で補償を行うのに必要な感覚情報の推定を行った。一方、高性能流体機械のバイオミメティクス・デザイン（劉・田中 G）として、飛翔生物翼の優れた空気力学特性（マイクロ渦の発生・制御、柔軟構造）や静音構造（マイクロ構造による渦制御や騒音抑制）を回転型流体機械（図2：生物規範翼をもつ風車、フクロウ翼静音機構）に応用することを目指し、産学連携でバイオミメティクス・デザインを流体機械に適用することで、次世代革新的な生物規範型流体機械の研究開発をも実施している。



図1 回流型超低速風洞と DPIV 流体計測システム 図2 生物規範流体機械の研究開発

最近飛翔生物の柔軟翼の変形や空気力学性能に対して統一的な法則が存在するのかを研究するために、昆虫であるスズメ蛾(Hawkmoth, *Agrius convolvuli*)と鳥であるハチドリ(Hummingbird, *Amazilia amazilia*)の異なる種の羽ばたき翼の変形と空気力学性能に関して、総合的に評価を行った結果、下記のような結果がわかった。1) 形態的には、体重 0.95g のスズメガと 5.3 g のハチドリは、翼長さがそれぞれ 36 mm と 71mm となり、アスペクト比が 2.9 と 3.9 で大きく違う。2) 羽ばたき運動(図3)は、周波数がそれぞれ 39Hz と 29Hz とで大きな相違があるが、ほぼ同じ振幅をもち、positional angle, elevation angle が比較的同様な時間的変化を見せる。3) 羽ばたき翼の翼スパン(長さ)方向のねじりに大きな相違が観察され、その度合いを表す feathering angle (図4)は翼端ではハチドリがスズメガより3割以上大きくなる。しかしながらこれらの feathering angle に対して翼長さで無次元化を図ると非常に似たような分布となることがわかる。4) スズメガとハチドリの柔軟翼と仮想的な剛体翼の計算流体力学モデルを用いて空気力学性能を比較すると、両方は垂直力(揚力)が約 31~33%アップ、効率も 14~15%アップとなる。以上により、翅脈と薄膜を有するスズメガの翼と、羽と筋骨格をもつハチドリの翼は、異なる形態や構造を持つ異種の飛翔生物の翼でありながら、似たような羽ばたき運動、且つ柔軟翼の変形を見せており、しかもそれらの空気力学性能もかなり近いことが明らかになった。この結果は、飛翔生物の柔軟羽ばたき翼のサイズ効果に関する統一的な法則の構築、さらに生物規範とする羽ばたき飛行ロボットの柔軟翼設計原理の創出につながるものと期待される。

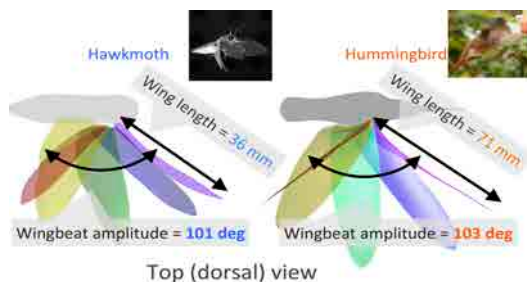


図3 スズメガとハチドリの羽ばたき運動

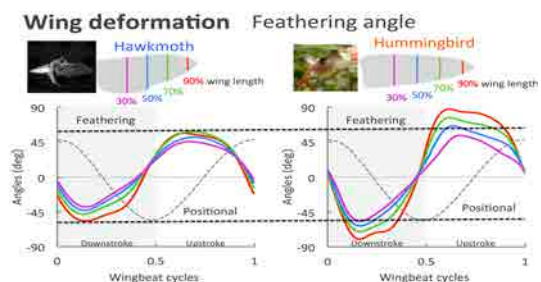


図4 スズメガとハチドリの翼変形

所属班：計画研究B-5班

所属機関：九州大学先端物質化学研究所

氏名：木戸秋 悟

所属機関住所：〒819-0395 福岡市西区元岡
744CE11-115

e-mail：kidoaki@ms.ifoc.kyushu-u.ac.jp

研究キーワード：メカノバイオマテリアル、細胞運動制御、幹細胞、細胞外マトリックス設計



細胞運動における弾性境界曲率応答性の原理探究

Study on the curvature effect of elasticity boundary on cell motility

細胞運動は生体組織の構築・形態形成と恒常性の維持をはじめ、免疫反応・炎症反応などの生体防御応答や、がん細胞の転移現象など、生体活動の諸局面における重要な基礎現象である。細胞運動の制御は、生体においては細胞の走性を駆動する様々な因子（液性化学因子、表面固定化学因子、電気化学勾配、光、周囲力学場勾配）によって行われており、その細胞外環境の精密な模倣は細胞行動を操作する生体材料設計の基盤技術の拡充において本質的であり、バイオメディックスの観点からの重要課題の一つでもある。当研究室ではこれまでに、細胞の周囲力学場の精密設計による細胞メカノタクシスの誘導と操作技術の開発を進めてきた。これまでに細胞メカノタクシスの誘導には、細胞一体の接着界面内における特定の閾値以上の弾性勾配強度の設計が不可欠であることを明らかとしてきた[1]。

しかし一方、これまでに確立されたメカノタクシスの誘導条件～シャープな弾性境界においてのみメカノタクシスは起こる～からは、この走性が特に局所的な現象であるとともに、実際の生体内においてクリアな一直線のシャープな弾性境界が存在する場所というのは稀にしか存在せず、生体内での細胞運動としていかなる場面で活用され得るかという点について必ずしも明確な理解が得られているとは言えない。実際の生体中では、弾性境界は直線線形の状況というものはほとんどなく、むしろ様々な場所でそれぞれの状況に特有の曲がった形状や弾性境界の方が現実的にはほとんどを占めるはずである。生体はいろいろな曲率を有する組織から構成されており、興味深いことにそれらの曲率に応答して異なる細胞種が棲み分ける挙動も見られる。そこで、本研究では、細胞運動、特にメカノタクシスの弾性境界の曲率応答性の原理を調べるために、異なる曲率半径を有する弾性境界を弾性マイクロパターンニング技術を用いて系統的に作製し、細胞運動の応答性を解析した。光硬化性スチレン化ゼラチンの 30wt%-(phosphate buffered

saline) (PBS) ゾル溶液 (3.0% sulfonyl campherquinone 含有) に可視光を照射し、ラジカル重合反応による光架橋にてゼラチンのゲル化を行った。自作の PC 描画像縮小投影光リソグラフィ装置を用い、光照射パターンの導入および光照射時間の制御を通じて、弾性境界の形状を変化させたマイクロ弾性パターンニングゲルを作製した。ゲルの弾性率分布は原子間力顕微鏡を用いた微視的圧入試験により測定した。これらのゲル上に 3T3 線維芽細胞を 1.5×10^3 cells/cm² の密度で播種し、8 時間インキュベーター内で培養した後、15 分間隔で 24 時間のタイムラプス観察を行った。細胞の運動軌跡は弾性境界と相互作用を起こした細胞について 12 時間分の軌跡を解析した。

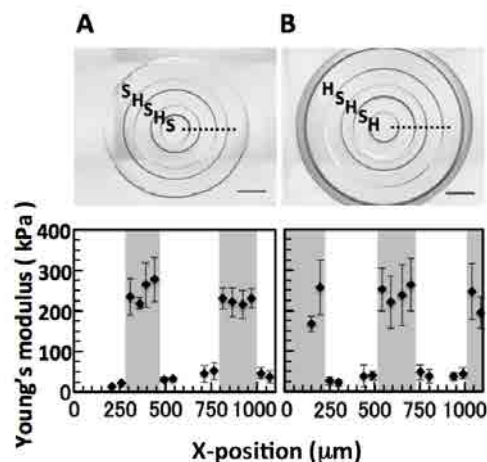


Fig.1. Microelastically-patterned gelatinous gel containing multiple elasticity boundaries with different curvatures.

曲率半径 50,100,250,500,750,1000 μ m の異なる曲率の円形パターンニングゲルを作製し (硬領域 : 300kPa, 軟領域 : 10kPa) (Fig.1), 細胞の運動軌跡の解析を行った。その結果、硬領域に向かう凸境界については曲率半径が大きい場合 (500, 750, 1000 μ m)、弾性勾配がメカノタクシス誘起条件を十分に満たしているにも関わらず、硬領域指向性運動は誘起されなかった。しかし、曲率半径が 250 μ m 以下になると硬領域指向性が誘起され、半径 100 μ m の弾性境界において最もその誘起効率が高くなった (Fig. 2)。一方、硬領域に向かう凹境界については曲率半径 750 μ m 以上の大きな弾性境界においては硬領域指向性が誘起されたが、500 μ m では偏向運動は消失し、100 μ m 以下の条件においては軟領域指向性運動が顕著となった (Fig. 2)。このような弾性境界形状条件に依存したメカノタクシス特性の変化には、細胞自体の形状との相互作用や、境界形状に起因するゲル界面の水平弾性率分布の摂動等が影響する可能性が考えられる。曲がった弾性境界におけるゲル内部の応力分布を解析したところ、50~100 μ m の凹境界においては境界近辺での内部応力が直線境界に比べて高まる傾向がある、これが軟領域指向性運動に寄与したものと考えられた。

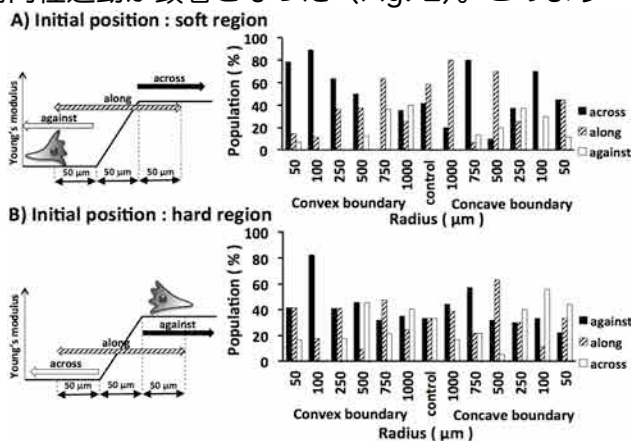


Fig.2. Characterization of overall directional movements of cells interacting with the elasticity boundaries with different curvatures.

参考文献

- 1) T. Kawano, S. Kidoaki, *Biomaterials*, **32**, 2725-2733(2011)

所属班：B01-4班

所属機関：東京大学先端科学技術研究センター

氏名：光野 秀文

所属機関住所：〒153-8904 東京都目黒区駒場4-6-1

e-mail：mitsuno@brain.imi.i.u-tokyo.ac.jp

研究キーワード：ガ類、フェロモンブレンド、性フェロモン
受容体、嗅覚受容細胞



ガ類の受容体によるフェロモンブレンドの検出機構の解明

Elucidation of detection mechanism of pheromone blend in moth

ガ類のオスは、メスが放出する種特異的な性フェロモンを検出し、同種のメス個体を識別する。これまで 1000 種類を超える昆虫種から性フェロモンが同定されており、その大半は複数成分が異なる比率で構成されるフェロモンブレンドであることが報告されている⁽¹⁾。オス個体は、フェロモンブレンドの構成成分を検出するとともに、それらの構成比率を検出することで、同種のメス個体を識別している。近年、性フェロモン成分を検出する受容体が発見され、各成分はこれら受容体で検出されていることが明らかにされてきた⁽²⁻³⁾。しかし、フェロモンブレンドの構成比率が性フェロモン受容体でどのように検出されるのかは明らかにされていない。そこで、本研究では、様々なガ類から性フェロモン受容体を同定し、受容体によるフェロモンブレンドの検出機構の解明を目的とする。これにより、複数成分から成るガスの新たな検出方法の提案につなげたい。

1) 性フェロモン受容体遺伝子の単離と機能同定

性フェロモン受容体はカイコガで初めて同定されて以降、現在までに 10 種類程度の昆虫種で報告されている⁽²⁻³⁾。しかし、一つの昆虫種で各性フェロモン成分に対応する受容体が同定された例はほとんどない。そこで、2~4 成分から成るフェロモンブレンドを利用するガ類（スカシバ類、スズメガ類、計 10 種類）を対象に、性フェロモン受容体の単離と機能同定を試みた。その結果、既知の性フェロモン受容体とアミノ酸類似性の高い候補遺伝子を各ガ類から複数種類単離することに成功した。アフリカツメガエル卵母細胞を用いた機能解析手法により、候補遺伝子のうちヒメアトスカシバから単離した受容体（NpOR1、NpOR3）が性フェロモン成分である (*E,Z*)-3,13-octadecadien-1-ol (EZ 体)、(*Z,Z*)-3,13-octadecadien-1-ol (ZZ 体) に

それぞれ特異的に応答を示すこと、NpOR1 及び NpOR3 は既知の性フェロモン受容体と同程度の感度を持ち濃度依存的に応答することが分かった。以上の結果から、NpOR1 と NpOR3 はヒメアトスカシバの各性フェロモン成分を検出する受容体であることを示した。現在、その他の候補遺伝子の機能同定を進めている。

2) 性フェロモン受容体を発現する嗅覚受容細胞の割合

ヒメアトスカシバはEZ 体と ZZ 体を 9:1 の割合で含むフェロモンブレンドを利用する。受容体によるフェロモンブレンドの検出機構を調べるため、まず RT-PCR を用いて触角における性フェロモン受容体の発現量の違いを調査した。その結果、主成分に反応する NpOR1 は NpOR3 よりも転写量が多く、受容体ごとに触角での発現量が異なることが示唆された。次に、触角の嗅覚受容細胞における性フェロモン受容体の発現様式を *in situ* ハイブリダイゼーションを用いて調査した。その結果、受容体ごとに発現する嗅覚受容細胞の数が異なることを見出した(図 1)。主成分に応答する NpOR1 を発現する細胞の割合は NpOR3 を発現する細胞よりも多く、その各受容体を発現する細胞の比率は性フェロモン成分の構成比率と類似した傾向を示す。このことから、ヒメアトスカシバのオスは触角の性フェロモン受容体を発現する嗅覚受容細胞の比率を調整することでフェロモンブレンドの構成比率を検出している可能性が示唆された。

今後、他の複数種類のカブトについて性フェロモン受容体を同定し、生体触角での発現様式を調査することで、受容体によるフェロモンブレンドの検出機構を一般化したい。

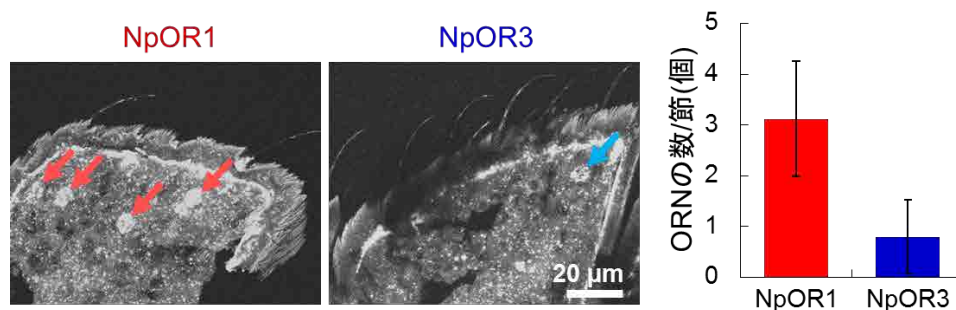


Fig.1 Expression of pheromone receptors in olfactory receptor neurons of male antennae.

参考文献

- (1) Byer, J.A. *J. Anim. Ecol.* **2006**, 75, 399-407.
- (2) Sakurai, T.; Nakagawa, T.; Mitsuno, H. et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2004**, 101, 16653-16658.
- (3) Mitsuno, H.; Sakurai, T. et al. *Eur. J. Neurosci.* **2008**, 28, 893-902.

謝辞

本研究で用いたカブトは鳥取大学農学部中秀司准教授よりご提供いただきました。心より感謝いたします。

所属班：B01-4班

所属機関：独立行政法人 森林総合研究所 森林昆虫研究
領域

氏名：高梨 琢磨

所属機関住所：〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

e-mail：takanasi@affrc.go.jp

研究キーワード：振動、行動、感覚、昆虫、害虫防除



カミキリムシにおける振動情報の機能解明と害虫防除への応用

Vibration Signals in Cerambycid Beetles and their Application to Pest Control

多くの昆虫は固体を伝わる振動や空気中を伝わる音に敏感であり、様々な場面でこの能力を利用している。例えば、捕食者が接近時に発する振動をいち早く検知して捕食者を回避する種、そして配偶者の発する振動を手がかりに配偶者を認識する種などがある⁽¹⁻²⁾。このように振動は、情報として様々な機能を持つことが明らかにされつつあるが、カミキリムシをはじめとする甲虫における知見は、未だ十分に蓄積されていない。そこで演者のグループは、異なる環境に生息する甲虫として、草本に生息するラミーカミキリと樹木に生息するマツノマダラカミキリを対象に研究を進めている。

1. ラミーカミキリの振動情報

草本は風による植物体の揺れによって低周波の振動刺激を受けやすいのに対し、樹木ではそのような低周波振動を受けにくい。ラミーカミキリが生息する草本植物であるカラムシの振動特性を解析したところ、風による振動は30Hz程度の周波数成分が卓越していた。一方、ラミーカミキリの着地や歩行によって生じる振動は30Hz以上の周波数成分も強く、風による振動とは特性が大きく異なっていた (Fig.)⁽³⁾。

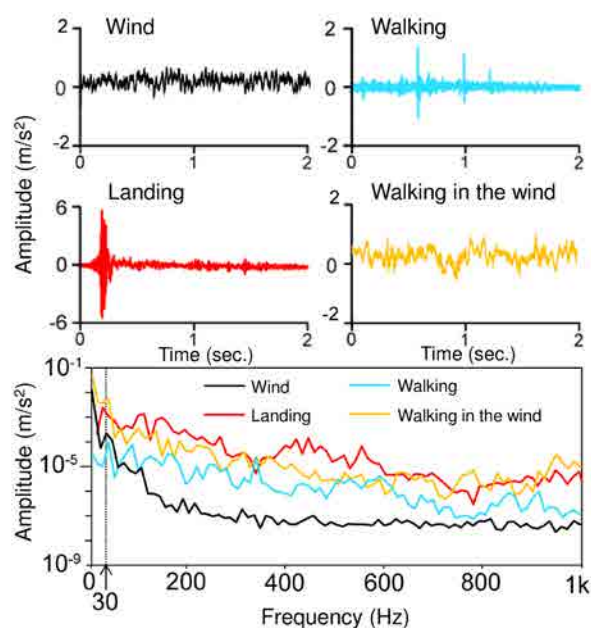


Fig. Vibrations generated by wind, a beetle landing on a leaf, a beetle walking on a leaf, and a beetle walking on a leaf in the presence of wind.

昆虫において、固体を伝わる振動は捕食者や配偶者の接近を感知するために用いられる。そのため、葉の上に生息するラミーカミキリにとって、葉を伝わる振動が生物由来なのか、または風による非生物的要因によるものなのかを識別する能力は重要である。そこで、ラミーカミキリに周波数や振幅の異なる振動を与え、生物由来の振動に対して、フリーズ反応（歩行の停止）や驚愕反応といった特異的な反応をするかどうか検証した。その結果、ラミーカミキリは、他個体の着地や歩行に由来する振動の周波数成分に対して、敏感に反応を示すことが明らかになった。

2. マツノマダラカミキリの振動情報と害虫防除技術への応用

マツノマダラカミキリの成虫はマツ材線虫病を伝播し、マツに壊滅的な被害を与えている害虫である。我々は、マツノマダラカミキリが低周波の振動によって、驚愕反応・フリーズ反応等の行動反応を示すことを明らかにしている。また、我々は振動がマツノマダラカミキリの肢に内在する弦音器官（感覚器の一種）により感知されることを甲虫で初めて発見した⁽²⁾。弦音器官は、多数の感覚細胞が細長い弦に付着しており、肢の接地面（マツ他）から振動を受容することができる。

これらの振動情報の機能を応用することで、害虫の行動を制御し、防除につなげることができる。振動を発生させる装置としては、超磁歪素子（磁界によってひずみを生じる合金にコイルを巻き、交流電流を流すことで振動を発生できる）が有用である。これにより、例えば景勝地・公園等のマツ名木毎に高出力の振動発生装置を取り付けてマツを守ることができ、殺虫剤の使用を抑えることで生態系への影響を最小限にした被害防止が可能となる。なお超磁歪素子によるモデル試験として、マツに振動を与えて、マツノマダラカミキリに忌避をおこすことには成功している。また、マツノマダラカミキリの産卵や摂食が、振動によって阻害されることも示している⁽²⁾。

振動を用いた害虫防除技術は、森林害虫のカミキリムシだけでなく、振動に感受性のある害虫種にも広く適用可能であるという特長をもつ。今後、振動情報に関する知見が様々な昆虫において蓄積することで、本防除技術が果樹や農作物等の被害対策など、広範囲に用いられると期待される。

参考文献

- (1) Kojima, W.; Ishikawa, Y.; Takanashi, T. *Biol. Lett.* **2012**, *8*, 717-720.
- (2) 高梨琢磨, 深谷緑, 小池卓二, 西野浩史, 生物科学 **2013**, *65*, 102-107.
- (3) 高梨琢磨, 椿玲未, 北島博, 細田奈麻絵, 日本音響学会聴覚研究会資料 **2014**, *44*, 195-196.

所属班：B01-3 生物規範階層ダイナミクス班

所属機関：独立行政法人 物質・材料研究機構

氏名：細田 奈麻絵

所属機関住所：〒305-0044

茨城県つくば市並木1-1

e-mail：Hosoda.Naoe@nims.go.jp

研究キーワード：昆虫、バイオミメティクス、接着、振動、可逆



昆虫から学ぶ接着技術

Bonding technology learning from insects

1. はじめに

ハムシ、テントウムシ、カミキリムシなどの昆虫は、葉や茎さらにはガラスの様な平らな表面上であっても垂直にも天井のような反転状態でも歩くことができる。本研究は、昆虫の優れた可逆的な接着のしくみを技術に取り入れるため、生息環境における昆虫の脚の接着特性の調査、接着原理の解明を行い、得られた知見を基に接着機構の設計と技術移転を行うことを目指している。研究の推進に当たり、新学術領域「生物規範工学」の班内及び班間連携を実施し、若手育成を目的に異分野で構成された研究班を股がったクロスボーダーポスドクを採用することも積極的に行った。以下はこれまでの研究活動の概要である。

●昆虫ミメティクスによるクリーンな水中接着法の技術開発に成功

大気中で生息する昆虫（ハムシ）が「泡」を利用して水中を歩けることを世界で初めて発見した。この水中歩行のしくみを解明し、「泡」を利用した「クリーンな水中接着法」の技術開発に成功した。その後クリーンな水中接着法の研究を発展させ、水中のみならず大気中でも高い接着性が得られる接着構造体の製作に成功した。（出願特許：2件）

●昆虫の脚裏を覆う分泌液の接着への影響に関する研究：班内・班間連携

ハムシ、テントウムシ、カミキリムシなどの昆虫の脚裏は分泌液で覆われており接着に寄与している。分泌液の接着への寄与を詳細に調べる目的で班内・班間連携により分泌液の成分、特にこれまであまり調べられていない水性成分の分析、液体のヒステリシスの影響、表面自由エネルギーの影響について調査している（Fig.1 参照）。

●異分野を股がる研究者の育成（クロスボーダーポスドク）：班間連携

生息環境に適応した昆虫の振動反応性と脚裏の接着機構の研究課題を実施するにあたり、異分野をクロスした2名の若手研究者の育成を実施し研究成果が得られた。

●新しい接合技術開発：班内連携

昆虫の研究から得られた知見を基に、セルフアライメント、可逆的接合を実現するため班内の研究者の連携により接着機構及び被着基板の製作を現在推進している。

●A班の生物の画像データベース作りに寄与：班間連携

昆虫の脚裏の電子顕微鏡像の多量のデータをA班が取り組んでいる生物の画像データベースに提供した。

●国際標準化に貢献

今後のバイオミメティクスを応用した製品化にあたり、国際標準規格（ISO）では”Biomimetics”の組織(TC266)を設置し審議している。B01-3 班から国際&国内プロジェクトリーダー1名（細田）、国内審議委員1名（穂積）が貢献している。

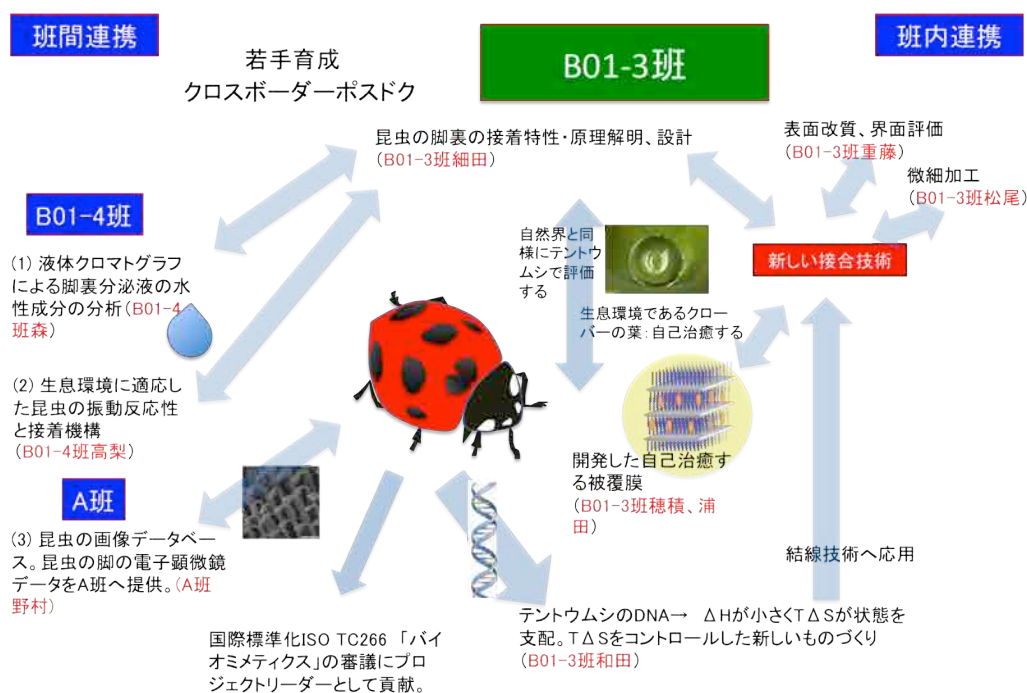


Fig. 1 The cooperation state between the groups on the study on biomimetic adhesion.

所属班：B01-3班

所属機関：独立行政法人産業技術総合研究所

氏名：穂積 篤

所属機関住所：〒463-8560

名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞2266-98

e-mail：a.hozumi@aist.go.jp

研究キーワード：自己組織化，層状化合物，防錆皮膜，自己修復



自己修復型防錆皮膜

Anti-Collosion Films With Self-Repairing Properties

金属材料の耐食性を向上させる手法として，金属表面の超はっ水化处理に注目が集まっている⁽¹⁻²⁾。しかしながら，このような人工表面は，摩擦や摩耗等のダメージにより，表面を被覆している分子の剥離，構造の劣化や崩壊，不純物の堆積等が起こると，その機能が著しく低下し，永久に回復しない。これに対し自然界では，例えば，メロンや蓮の葉は分泌液を放出して，傷の補修，超はっ水性，セルフクリーニングといった優れた機能を発現，持続させている⁽³⁾。このような生物体の自己補修，機能維持メカニズムに学び，機能性分子（例えば防錆剤）が持続的あるいは何らかの刺激により徐放されるような皮膜を開発することができれば，材料の耐久性・寿命が著しく向上することが期待される。また，皮膜を積層構造化することにより，最表面層の機能が劣化した場合でも，それを剥離除去することで，表面機能の回復が期待できる。本講演では生物の自己補修，機能維持メカニズムに学んだこれまでにない高性能防錆皮膜について報告する。

本研究では，アルコキシド（テトラメトキシシラン：TMOS），アルキルシラン（デシルトリエトキシシラン：C₁₀），エタノール，塩酸の混合溶液に防錆剤であるトリルトリアゾール（TTA）を 6 wt% 添加して調製した前駆液を UV/オゾン洗浄した各種基板にスピんキャストし，風乾することで，TTA 含有層状ハイブリッド皮膜（以下，C₁₀-TTA ハイブリッド皮膜と表記）を得た。

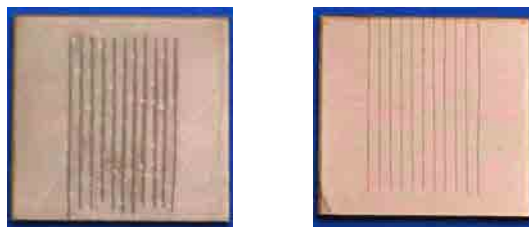


Fig.1 Cu substrates with scratches after submersion in 5 wt% salt water for 24 h (left: C₁₀-hybrid film/Cu and right: C₁₀-TTA hybrid film/Cu substrates, size: 2cm□).

皮膜の自己修復性を評価するため、銅基板に成膜した C_{10} -TTA ハイブリッド皮膜に予めナイフによりスクラッチを入れ、5 wt%の塩水中に室温で 24 時間浸漬した。比較のために、防錆剤を添加していない C_{10} -ハイブリッド皮膜も同様に評価した。図 1 から明らかなように、浸漬 24 時間後、 C_{10} -ハイブリッド皮膜（左側）はスクラッチ部位だけでなく、周辺部位も腐食が進行しているのに対し、 C_{10} -TTA ハイブリッド皮膜（右側）はいずれの部位も腐食が進行していないことが確認された。X 線光電子分光法 (XPS) により、 C_{10} -TTA ハイブリッド皮膜のスクラッチ部位と非スクラッチ部位の表面状態を分析したところ、TTA に由来する窒素がスクラッチ部位において高濃度で検出されたことから、TTA がスクラッチ部位に移行し、腐食の進行を抑制していることが確認された（自己修復性の確認）。続いて、ダメージを受けた際の皮膜機能の回復性を評価するため、皮膜に波長 172 nm の真空紫外 (VUV) 光を照射し、強制的に皮膜表面のアルキル基を光酸化して表面を親水化した（前進接触角(θ_A)/後退接触角(θ_R) = $<5^\circ/-$ ）。その後、皮膜最表層をテープにより剥離除去し、表面の状態を調べたところ、層の一部が残存してはいるものの大部分が除去されていることが明らかとなった。また、剥離により新たに露出した表面の水滴接触角を測定したところ、初期の水滴接触角 ($\theta_A/\theta_R = 110^\circ/100^\circ$) とほぼ同じ値 ($\theta_A/\theta_R = 108^\circ/96^\circ$) まで回復していることを確認した。これにより、ダメージを受けた表面層が剥離除去され、内部のはっ水性表面が再び露出していることが確認された（機能再生の確認）。最後に、塩水噴霧試験 (JIS Z 2371) により、皮膜の長期耐食性を評価した結果を図 2 に示す。未処理、 SiO_2 皮膜を被覆した銅基板は、わずか 2 時間で腐食が始まった。 C_{10} -ハイブリッド皮膜を被覆した銅基板は約 8 時間で腐食が始まったのに対し、 C_{10} -TTA ハイブリッド皮膜を被覆した銅基板は 2000 時間以上経過しても、腐食は確認されず、優れた耐食性を示すことが明らかとなった。また、アルミニウムに対しても同様の結果が得られたことから、実装材料（例えばワイヤーボンディング）へのコーティングにより長寿命化、信頼性向上が期待できる。



Fig.2 Cu substrates after salt water spraying test for 2000 h (Cu, SiO_2 film/Cu, C_{10} -hybrid film/Cu, and C_{10} -TTA hybrid film/Cu).

参考文献

- (1) Hozumi, A.; Kim, B.; McCarthy, T. M. *Langmuir* **2009**, 25, 6834.
- (2) Qian, B.; Shen, Z. *Langmuir*, **2005**, 21, 9007.
- (3) Wang, X.; Liu, X.; Zhou, F.; Liu, W. *Chem. Commun* **2011**, 47, 2324.

所属班：公募班

所属機関：北海道大学大学院 情報科学研究科

氏名：有村 博紀

所属機関住所：〒060-0814 札幌市北区北14条西9丁目

e-mail：arim@ist.hokudai.ac.jp

研究キーワード：バイオミメティクス・データベース、
オープンイノベーションプラットフォーム、シソーラス



バイオミメティクス・データベースの オープンイノベーションプラットフォームへの展開

Biomimetics Database as a Platform for Open Innovation

1. はじめに

「バイオミメティクス・データベース」は、生物学や材料科学等の異分野のデータベースを大容量画像データ検索技術により横断的に検索し、類似の画像をクラスタリングして提示することで、新たな気づきを提供する発想支援型のデータベースであり、技術革新と新産業育成の基盤になるものとして構築が進められている。また、ISO/TC266では、日本の提案で設置されたWG4において、バイオミメティクスの研究開発に資する知識インフラの国際標準化について議論を行っている。

本研究では、異分野連携を促進するオープンイノベーションプラットフォームを実現するために、海外動向と国際標準化の活用を踏まえて、バイオミメティクス・データベースに必要なデータ構造、具備すべき機能、機能を実現するための技術、運営方法を提示することを目標としている。目標の達成に向け、これまで、海外動向調査・分析と国際標準化活動、産業応用に関する調査・分析（企業インタビュー）を実施してきた。本発表ではデータベースの海外動向と国際標準化活動を中心にその経過を報告する。

2. バイオミメティクス・データベースに関する海外動向調査・分析

国際標準化の方策を検討するにあたり、海外におけるバイオミメティクス関連のデータベースの構築状況を把握するために、海外主要国・地域（EU、ドイツ、英国、フランス、米国）のバイオミメティクス関連の研究プロジェクトを調査・分析したところ、

ドイツで新規材料開発への応用を目的とした極限環境生物のデータベース作成を行うプロジェクト⁽¹⁾が 1 件見られた。また、研究プロジェクトではないが、米国において生物の機能の情報やその応用事例を検索できるデータベース"Ask Nature"が見られた⁽²⁾。総じて、バイオミメティクス関連のデータベース構築の動きはほとんどなく、また、見出された事例も個別分野のデータベース構築や過去情報の整理に留まっており、我が国が国際標準化をリードできる状況にあることが分かった。

3. バイオミメティクス・データベースの国際標準化活動

本公募班では、コンビーナである独立行政法人科学技術振興機構の恒松直幸氏、プロジェクトリーダーである北陸先端科学技術大学院大学の溝口理一郎教授とともに WG4 における国際標準化活動を行っている。昨年 10 月にプラハで開催された ISO/TC266 第 3 回総会において、生物学と工学のデータベース連携に必要なシソーラスの作成の指針を標準化の対象とすることを合意し、それを踏まえ、国内 WG4 でスコープの改訂案を取りまとめた。さらに、企業の研究者等へのインタビュー調査の結果を踏まえて、標準化作業の進め方を検討し、①機械工学と材料工学を対象にシソーラスを試作し、それをもとに作成の指針を取りまとめること、②既存のシソーラスは個別分野に分かれており、生物学と工学の専門用語を直接関係付けることは難しいため、抽象的な機能の概念を体系化した機能オントロジー⁽³⁾を経由してそれらをつなぐことを決定した。現在、10 月にベルギーで開催される第 4 回総会での提案に向けて準備を進めている。

4. まとめ

これまで、海外のデータベース構築の状況を把握するとともに、国際標準化の方策を検討する中で、必要なデータ構造や機能、機能を実現する技術について検討してきた。今後は、EU の Horizon2020 を中心とした海外動向の調査・分析と国際標準化活動を継続して行うとともに、企業の研究者等へのインタビュー調査を深掘りして実施し、バイオミメティクス・データベースに求められる機能や運営方法を検討、提示する。

参考文献

(1) フライベルク工科大学,

<http://tu-freiberg.de/exphys/biomineralogy-and-extreme-biomimetics>, (参照 2014-07-09)

(2) Biomimicry 3.8 Institute, <http://www.asknature.org/>, (参照 2014-07-07)

(3) 古崎 晃司, 來村 徳信, 溝口 理一郎. 生物多様性を規範とした材料技術開発支援に向けたバイオミメティック・オントロジーの

the Japanese Society for Artificial Intelligence, **2013**.

所属班：公募研究班、B01-5 班

所属機関：千葉大学

氏名：田中 博人

所属機関住所：〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区 1-33

e-mail：htanaka@chiba-u.jp

研究キーワード：Self-organized wrinkles, Parylene,
Flapping wing, Micro robotics



自己組織化シワによる小型羽ばたき機用翼膜の剛性制御

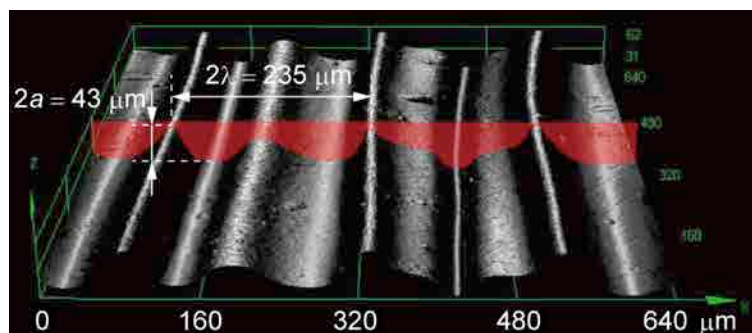
Stiffness Control of Wing Membranes with Self-Organized Wrinkles for Micro Ornithopters

1. はじめに

昆虫や鳥などの飛翔生物を規範とした小型羽ばたき機では、翼面の受動的変形によって迎え角が適切に保たれ大きな空気力が発生する。羽ばたき機の翼構造は一般的に、比較的高剛性のフレームに薄いプラスチックフィルムを張って製作され、翼の剛性はフレームの形状にほぼ依存する。本研究の目的は、翼フィルム自体にも剛性を異方的に与えることにより、翼面の受動的変形を高い自由度で設計し、空気力学特性を向上することである。そのために、翼フィルムに微小なシワを配向させ、フィルムの曲げ剛性と引張剛性を異方的に制御する方法を提案する。

2. 微小シワを持つパリレンフィルム翼膜

想定する翼サイズは、翼長が 50 mm から 100 mm のハチドリほどの大きさとし、翼周りの流れに影響がないシワの大きさとして波長 1 mm 以下、振幅 0.5 mm 以下とする。このようなマイクロスケールのシワ形状をセンチメートルオーダの広さで実現



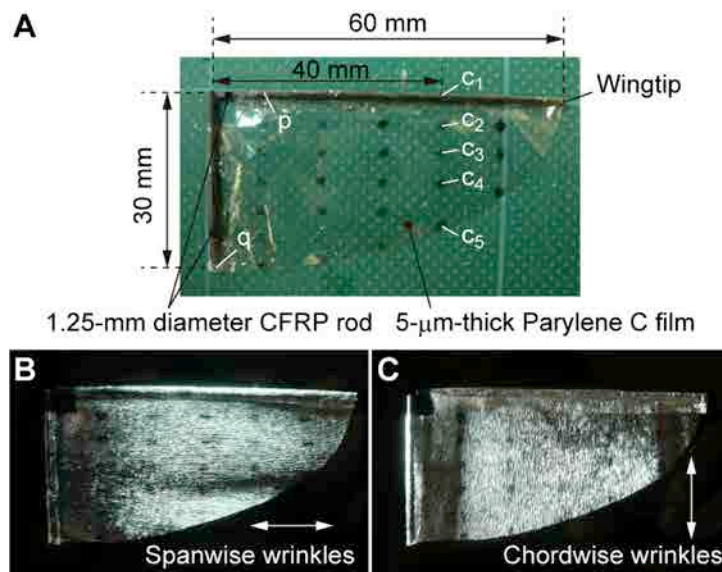


Fig. 2 Fabricated wings with and without parallel wrinkles

する方法として、シワの自己組織化的発生現象を利用する。これはエラストマーなどの弾性基板の表面に高剛性の薄膜を密着させた状態で基板を圧縮すると、圧縮方向に応じて表面にシワが瞬時に発生する現象である⁽¹⁾。本研究では、シリコンエラストマー基板表面に生成したシワをモールドとして利用し、シワ表面上にパリレンフィルムを成膜してリリースすることで微小シワを持つ独立したパリレンフィルムを取り出した。

シワがフィルム剛性に与える影響を調べるために、平行に配向したシワを持つパリレンフィルムの引張試験を行った。フィルム厚は $4\ \mu\text{m}$ で、シワの波長は約 $120\ \mu\text{m}$ 、振幅は約 $20\ \mu\text{m}$ である (Fig. 1)。その結果、シワに垂直な方向の引張弾性率はシワ平行方向に比べて 18% の値となった。また、フィルムの曲げ剛性はシワによって 100 倍以上増加することが断面 2 次モーメントから推定された。これにより微小シワの配向方向によってフィルムの剛性を変えられることが示された。

さらに、この平行シワ付きフィルムと高剛性ロッドを用いて翼を製作し、固定羽ばたき機構で羽ばたかせて翼面変形と垂直空気力を計測した (Fig. 2)。その結果、翼弦に平行にシワを配向させると後縁部の極端な曲げ変形が抑制され、シワが無い場合に比べて垂直空気力は 220% となり、フィルム剛性の異方的制御によって羽ばたき翼の空気力学的特性を向上できることが示された。

参考文献

- (1) Genzer, J.; Groenewold, J., Soft matter with hard skin: From skin wrinkles to templating and material characterization. *Soft Matter* 2006, 2 (4), 310-323.

所属班：公募班

所属機関：独立行政法人海洋研究開発機構

氏名：出口 茂

所属機関住所：〒237-0061 横須賀市夏島町2-15

e-mail：shigeru.deguchi@jamstec.go.jp

研究キーワード：バイオクレプティックス／ナノバイオテクノロジー／セルラーゼ／深海微生物



材料科学からアプローチするバイオクレプティックス

Biokleptics with Materials Science Approach

Rawlings らは、最近 biomimetic research を bioinspired、biomimetics、biokleptics の3つに分類することを提唱した⁽¹⁾。biokleptics (klept-, from Greek kleptēs ‘thief’) とは、“a biological reagent is used to aid a synthetic process”と定義される。生物を規範とした biokleptics を考える上で最も興味深いのは、地球の生態系を数の上で支配し炭素循環などで重要な役割を担う微生物である。しかしながら大きさが数 μm しかない小さな生物が持つ機能・有用性を「いかにして学ぶか？」には、未だ多くの課題が残されている。

我々は、材料科学の知見を応用した微生物機能のセンシングに関する研究を進めてきた。直径数十 nm のセルロースナノファイバーからなるヒドロゲル表面 (Fig. 1) に、インクジェットパターンニング装置を用いて極微量 (100pL 以下) のセルラーゼ溶液を滴下すると、セルロースが酵素加水分解を受けて三次元ネットワーク構造が破壊された結果、ゲル表面にピットが形成される (Fig. 2)。3D レーザー顕微鏡を用いた非接触

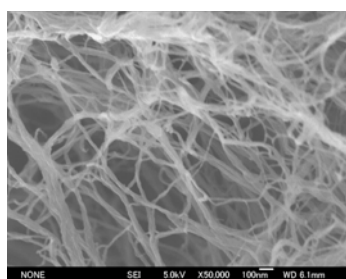


Fig. 1. SEM image of cellulose hydrogel. 3D network of nanofibrous cellulose are seen.

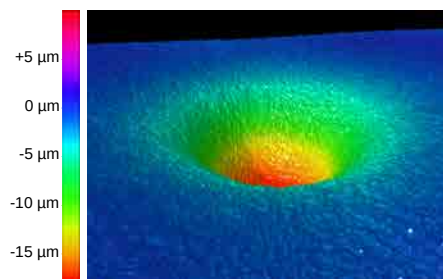


Fig. 2. 3D height map of a pit formed on the surface of

表面分析によって、反応時間に伴うピット体積の変化を測定したところ、ピット体積が反応開始直後は時間とともに直線的に増加することを見出した (Fig. 4)。直線の傾きより求めたピット形成速度 (セルロース加水分解速度) は滴下したセルラーゼ溶液量に比例したことから (Fig. 5)、ピット体積がセルロースの酵素分解評価の定量的な指標として利用できることが分かった。またピット形成の際に加水分解されたセルロースの重量は数 ng であり、ピット体積がセルロース酵素分解をアッセイする超高感度な指標であることもわかった。

昨年度は数値シミュレーションによるピット形成過程の解析も試みたが、測定の時間分解能が低いために実験とシミュレーションの比較が困難であった。そこで新たな 3D レーザー顕微鏡 (レーザーテック社製 Optelics Hybrid) を導入した。高速イメージングが大きな特長の新装置は 4 つのピットの体積を約 20 秒で測定可能であり、測定の時間分解能を大幅に向上することに成功した (Fig. 6)。他にもゼラチンゲルを基質としたプロテアーゼの活性測定、さらには酵素加水分解を利用したゲル表面のパターニングに向けた予備的検討を進めた。

これらと並行して深海から分離した新規微生物が生産するセルラーゼの解析も進めた。太陽光が届かず光合成とは無縁の深海に生息する微生物が、進化・適応の過程で獲得したセルロース分解のメカニズムと陸上生物のセルロース分解メカニズムには様々な違いがあると予想される。昨年度は、GE09 株および TYM08 株のドラフトゲノムシーケンスを取得し、セルラーゼをコードしていると思われる遺伝子を複数同定した。現在、組み換え実験によるセルラーゼの発現およびその機能解析を東京大学のグループと共同で進めている。

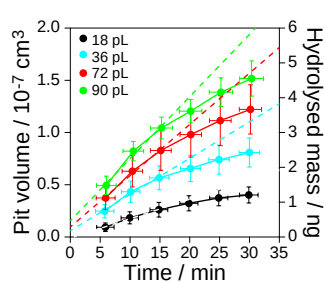


Fig. 4. Change of the volume of the pit formed after depositing various amount of the cellulase solution.

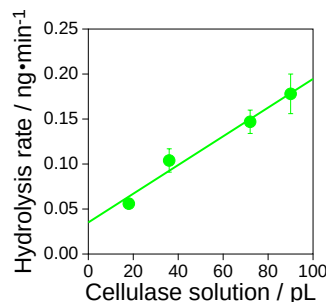


Fig. 5. Relationship between measured hydrolysis rate and the amount of deposited cellulase solution.

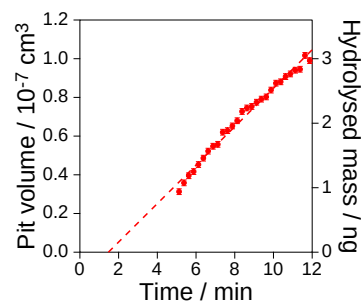


Fig. 6. Change of the pit volume measured by the new instrument. Time resolution of the measurement is significantly improved.

- (1) Rawlings, A. E.; Bramble, J. P.; Staniland, S. S. *Soft Matter* **2012**, 8, 2675-2679.
- (2) Deguchi, S.; Tsudome, M.; Shen, Y.; Konishi, S.; Tsujii, K.; Ito, S.; Horikoshi, K. *Soft Matter* **2007**, 3, 1170-1175; Tsudome, M.; Deguchi, S.; Tsujii, K.; Ito, S.; Horikoshi, K. *Appl. Environ. Microbiol.* **2009**, 75, 4616-4619.

所属班：B01

所属機関：大阪工業大学

氏名：藤井秀司

所属機関住所：〒535-8585

大阪府大阪市旭区大宮5-16-1

e-mail：syuji.fujii@oit.ac.jp

研究キーワード：微粒子、リキッドマール、泡、界面

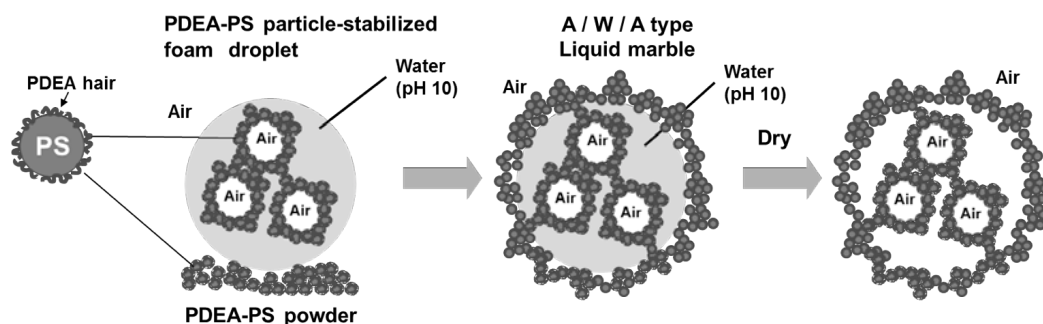


微粒子由来凹凸構造を利用する気液分散体の安定化

Stabilization of Gas-Liquid Dispersed Systems Utilizing Rough Surface Structure Formed by Particles

微粒子が気液界面に吸着することでリキッドマール（LM, Water-in-Air 型分散体）、泡（Air-in-Water 型分散体）の安定化が可能であることが知られている⁽¹⁾。微粒子の界面吸着現象は界面張力を駆動力としており、現行の重力支配下における他律的エネルギー消費型のものづくりに対し、自律的省エネ型のものづくりを可能にする。

これまでに、発表者らを含めた数研究グループによって、疎水的表面を有する粒子は LM⁽²⁾を、親水的表面を有する粒子は泡⁽³⁾を安定化し、単一粒子表面への水の濡れ性が、分散系を決定する重要な因子であると報告されてきた⁽¹⁾。しかし発表者らは最近、親水的表面を有する一種類の高分子粒子で、LM および泡、両系を安定化できるという、単一粒子表面への水の濡れ性だけでは説明できない興味深い現象を見出した。粒子集合体が界面に吸着することで分散体が安定化している事実を考慮に入れると、この現象を理解するには、粒子集合体が形成するサブセルラーサイズの凹凸を有する表面における水の濡れ性に注目することが重要との着想に至った。



Scheme 1 Diagram illustrating preparation of air-in-water-in-air (A/W/A) type dispersed system

高分子粒子乾燥体の走査型電子顕微鏡観察の結果、サブミクロンメートルサイズの粒子から形成される数十ミクロンメートルの粒子凝集体を確認した。このことから、LM の作製に用いる粒子乾燥体表面には粒子の凝集体由来の凹凸が存在するといえる。粒子乾燥体上における水滴の接触角を測定した結果、 118° と求まり、親水的に振舞う粒子表面(接触角 52°)とは異なり、撥水性を示すことが明らかになった。これは、凹凸を有する粒子乾燥体表面の凹部に空気が存在

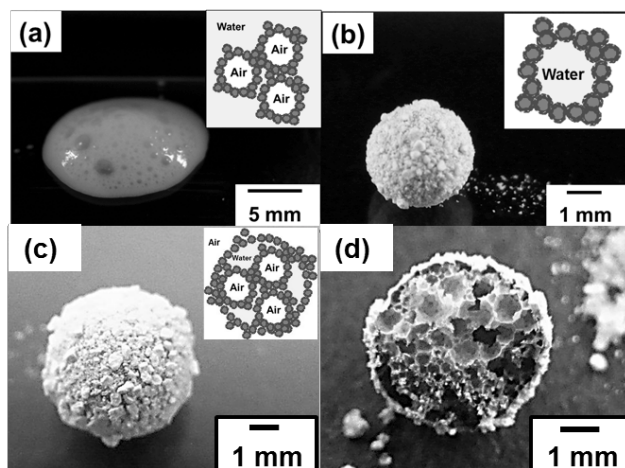


Figure 1 Digital photographs of (a) PDEA-PS particle-stabilized foam, (b) liquid marble stabilized with PDEA-PS particles, (c) A/W/A type liquid marble and (d) cross section view of the dried A/W/A type liquid marble.

し、疎水性表面として振る舞う準安定 Cassie-Baxter 状態をとったためだと考えられる。

Figure 1 (a)および(b)に、高分子粒子によって安定化された泡および LM のデジタルカメラ写真を示した。粒子安定化泡 (Figure 1 (a))を高分子粒子乾燥体上に滴下して転がすことで、A/W/A 型 LM の作製に成功した(Figure 1 (c))。また、Figure 1 (d)に乾燥後の A/W/A 型 LM の断面のデジタルカメラ写真を示した。断面図から内部に多数の空洞を確認した。これは、内部に導入された泡が乾燥したものだと考えられる。以上の結果から、濡れのモードの違いを利用することで、粒子安定化泡を大気中で安定化した A/W/A 型 LM の作製が可能であることを明らかにした。

References

- (1) (a) Fujii, S.; Murakami, R. *KONA Powder Particle J.* **2008**, 26, 153-166.; (b) McHale, G.; Newton, M. I. *Soft Matter* **2011**, 7, 5473-5481.
- (2) a) Dupin, D.; Armes, S. P.; Fujii, S. *J. Am. Chem. Soc.* **2009**, 131, 5386-5387. b) Fujii, S.; Kameyama, S.; Armes, S. P.; Dupin, D.; Suzaki, M.; Nakamura, Y. *Soft Matter*, **2010**, 6, 635-640. c) Fujii, S.; Suzaki, M.; Armes, S. P.; Dupin, D.; Hamasaki, S.; Aono, K.; Nakamura, Y. *Langmuir*, **2011**, 27, 8067-8074. d) Fujii, S.; Aono, K.; Suzaki, M.; Hamasaki, S.; Yusa, S.; Nakamura, Y. *Macromolecules* **2012**, 45, 2863-2873. e) Ueno, K.; Hamasaki, S.; Wanless, E. J.; Nakamura, Y.; Fujii, S. *Langmuir* **2014**, 30, 3051-3059.
- (3) a) Fujii S.; Ryan, A. J.; Armes, S. P. *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, 128, 7882-7886. b) Fujii, S.; Iddon, P. D.; Ryan, A. J.; Armes, S. P. *Langmuir* **2006**, 22, 7512-7520. c) Fujii S.; Mochizuki, M.; Aono, K.; Hamasaki, S.; Murakami, R.; Nakamura, Y. *Langmuir* **2011**, 27, 12902-12909.

所属機関：株式会社ペコ I P Mパイロット

氏名：浦野 知

所属機関住所：〒860-0004熊本県熊本市中央区新町4
丁目4-7

研究キーワード：scaling, animal physiology,
population ecology, integrated pest management(IPM), egg shell

公開講演会 下澤名誉教授古稀記念特別企画

シュミットニールセンの「スケーリング：動物設計論」を翻訳
して～下澤教授に教えられたこと



Japanese translation of "Scaling: Why is animal size so
important" and

What I've been taught by Professor T. Shimozawa

1. 下澤楯夫「動物比較生理学講義」

下澤教授の生理学の講義を受けたのは、1984年であったか、85年であったか、その両年であったか、すでに記憶が曖昧になっている。なにしろこわい先生だった。数学の苦手な生物学志望学生には、難しい内容だった。ただ、毎回、思考上の石積みの練習をするような喜びがあった。練習に使う石は、熱や光などの概念と動かしがたい法則である。その講義には、名言がちりばめられていて、なかでも、生物学を生業とする覚悟について語られた言葉を、その後、私は何百回となく、仕事仲間に伝えてきた。曰く、「物理学、化学は、道具やものさしにつけられた名前だ。だから、物理学者や化学者は、なにか持ってこられたときに、“これは、うちの道具では測れません。”というときがある。生物学は、“生物”という対象につけられた名前だ。だから、なにか生きものを持ってこられたら、なにがなんでも、このわけのわからないものを測らなければならない。そのために、物理の道具も化学の道具も使う。使えなかったら、物理や化学の専門家に、“鍛え直せ”と突き返すことができる。」

いま、私は、農業生態系に関する情報サービスを仕事としている。特に、わけのわからない作物の病気や害虫の個体群を、いろいろな道具で測る。そのとき、“分野外です”と逃げることはできない。なんとか、測ろうとする。繁殖して、増えたり減ったりするもののすべてが当社の取扱い対象である。特に、数理モデルと統計手法を専門的に使う。測れないときには、「鍛え直せ」「鍛え直せ」と、自分に言い聞かせながら、数学を生

業とする人に教えを乞いに行く。

その下澤教授の動物比較生態学では、K. シュミットニールセンの"Animal Physiology - Adaptation and Environment"を教科書として用いていた。その講義の終わり近く、「これから、本で勉強するなら、一人の著者が書いたものを読みなさい。共著だと、考え方や思想がぼやける。一人の著者が、一つの視点、一貫した思想のもとに著した本を選びなさい。」と言われた。考え方を確立すべき時期の学生に向けた言葉だったが、今でも未知の分野を学ぶとき、使える教えである。

そのとき、勧められた幾冊かのうちのひとつが、教科書と同じくK. シュミット・ニールセンの"Scaling Why is animal size so important?"であった (Fig.1)。

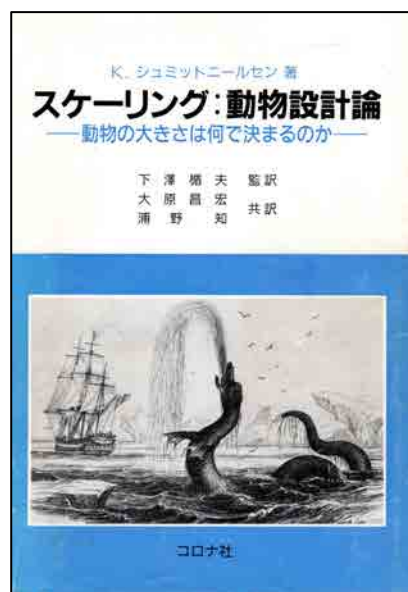


Fig.1 Japanese translation of "Scaling: Why is animal size so important" (Knut Schmidt-Nielsen, 1984)。

2. シュミットニールセンの「スケーリング：動物設計論」を翻訳して

そんなわけで、数年後、農学部で Scaling の本読み会を主催した（1990年～‘91年）。農学部と理学部の大学院生が主体だった。そこへ思いがけず下澤教授が参加してくださったので、読みと理解は格段に深まった。

素晴らしい本だった。どの章においても、生きものに物理法則が与える制約と可能性のせめぎあいがある、鮮明なイメージの連続で描き出されている。なかでも第4章 卵のスケーリングに、私は夢中になった。鶏卵の殻には直径約 $17\mu\text{m}$ の細い穴が、およそ 1 万個開いている、これらすべてを寄せ集めると面積約 2.3mm^2 、長さ（すなわち卵殻の厚さ）約 0.35mm の管になる。また、実際に卵殻越しに気体を拡散させることによ

って、この仮想の「管」の形状を測ることができる。この管は、卵の内側からの水分の蒸散を抑えつつ、外側からの十分な酸素供給を担う。私は、物理的制約と、概念上の「管」の計測方法に大いに魅かれた。本読み会のメンバーであった大原昌宏氏は、系統分類学が専門である。それで、卵殻の形状・構造の系統に興味を持たれたのではないかと思う。二人で、いろいろな鳥の卵の電子顕微鏡写真を撮影した。

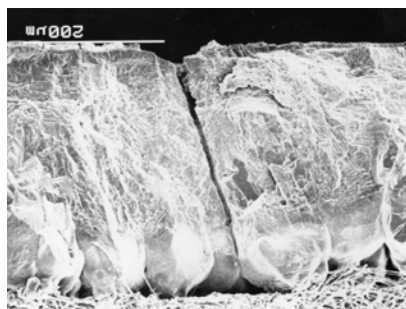


Fig.2 SEM image of the egg shell of the chicken, *Gallus gallus domesticus* (cross-section surface).

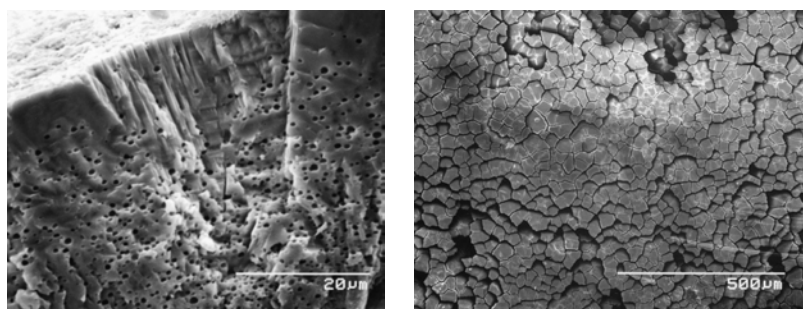


Fig.3 SEM image of the egg shell of the Grey Wagtail, *Motacilla cinerea* (cross-section surface).

Fig.4 SEM image of the egg shell of the Japanese Quail, *Coturnix japonica* (surface).

ニワトリの卵の殻の断面には、本書において記述されているような、見事な細い管があった(Fig.2)。ところが、キセキレイの卵では、殻の空気穴はスポンジ状になっており、1本1本の細い管ではない(Fig.3)。また、ウズラの卵殻の表面には、微細なタイルを敷き詰めたような構造が見られる(Fig.4)。

さて、先述の本読み会がもととなって、後に下澤教授の提案で、この本の翻訳をすることになった。作業にあたったのは、下澤（監訳）、大原、浦野の3人である。

当時は、ワープロもなかったので、分担して訳文をつくり、それぞれタイピストに打ってもらって3人で回し読みし、修正意見を加筆し、分担者が再度検討して修正する、

それをまたタイプしてもらい回し読みするという作業を繰り返した。私の拙い読解力では、翻訳の助けになったのか、邪魔をしたのか、今では疑問に思うが、とにかく得難い訓練を受けたことは間違いなかった。

この訳本には、原著にはない大きな特典がついている。それは、下澤教授による「訳註」である。原著には、AからEまで、5つの附録がついている。これらはシンボル、アロメトリー式の解説の他、基本的な数式とその説明の必要最小限のものである。訳本では、これらに加えて、A'、およびFからLまで、豊富に図を使った8つの附録が「訳註」として加えられている。いずれも、物理法則と生物のメカニズムを下澤教授が明快に解説したもので、「訳註」とするより、小冊子にして傍らに置きたいような見事な内容となった。

3. 測れないものを測れるように

下澤教授の講義のなかでも、強烈な印象を受けたのは、細胞膜の構造の解明であった。まだ、電子顕微鏡もない時代に、膜を透過する物質の濃度変化のグラフのみを使い、いかにして、未知の構造を推定したのか。そこで用いたドナン-ギブスの膜平衡の難しい数式のすべてを思い出すことはできないが、そのプロセスと思考法は、いまでも仕事をする際の強固な礎となっている。つまり、見えないものを見えるように、測れないものを測れるようにする、それが道具としての科学である、という考え方である。望遠鏡しかり、万有引力の式しかり。後年、個体群生態学（Population ecology）の使い手として、これを総合的害虫管理（IPM: integrated pest management）に役立てるために会社を設立した際、名称を「株式会社ペコIPMパイロット（Peco IPM Pilot Co., Ltd）」としたのも、科学が真に人の役に立つことができるなら、大学以外でもこれを道具として必要とする人たちがいるに違いないと考えたからである。会社パンフレット1号のおもて面（Fig.5）には「見えないものを見えるように、測れないものを測れるように」と記し、裏面には「データが採られたときに、景色の向こう側にあったものを再構成します。」と宣言した。「下澤生理学」が、遠いところで実を結んだ事例として紹介する次第である。



Fig.5 Brochure of Peco IPM Pilot Co., Ltd.

所属班：総括班 評価グループ

所属機関：北海道大学 名誉教授

氏名：下澤 楯夫

所属機関住所：〒060-0808札幌市北区北八条西5丁目

e-mail：tsmz@es.hokudai.ac.jp

研究キーワード：空気と水、物理的性質、生物進化、多様性



マーク・デニー著「空気と水」について

On book "Air and Water" by Mark Denny

1. はじめに

生物規範工学の普及に向けた教科書の一つとして、Mark Denny 氏の著作「Air and Water」を翻訳出版しようと考えている。この本は 1988 年の全米動物学会年会で Denny 氏が行ったシンポジウム講演がきっかけになっている。生物学者が空気と水の中の生物の違いをどう捉えているかの幾つかの講演の導入部分として、空気と水の物理を簡単にまとめて話すように頼まれて行ったものである。

「まえがき」によれば、Denny 氏は二つ返事で引き受けたものの、シンポジウムが近づいてから不安に駆られた。流体の物理が生物に与えた影響については、入門書に書き古されている。それ以外に何を話せば良いのだろうか？彼は焦って図書館へ行き、急いで Handbook of Chemistry and Physics をめくり始めた。数ページ行ったところで、少し落ち着いて来た。同じ温度変化に対する粘性率の変動は、水より空気の方が大きいことが出ており、面白そうに見えた。更に数ページ進むと、低周波音は乾燥空気中よりも湿潤空気中を遠くまで届くことを発見した。これには何か生物学的な影響があるに違いない。それから、空気の電気抵抗の記載があり、それは海水の 200 億倍だと書いてあった。ヤッタ！これは何かある。さらに、気体分子の空気中での拡散係数は、水中で

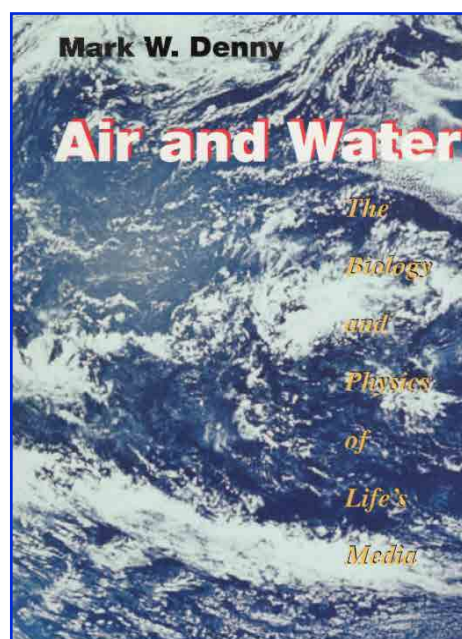


Fig. 1 "Air and Water" by Mark Denny, Princeton University Press, 1993

のその10,000倍もある。
この違いは代謝にどんな
影響を及ぼすのだろうか？
ページをめくればめ
くるほど、益々面白くなり、
さらに追いかけて続けた。

その「あとがき」で、
Denny氏は「ここまでの
14章にたくさんの理論
を紹介した。しかし、そ
の価値はそこに並べた
結論にあるのではなく、
読者が自分の周りの世
界から何か新しく興味

深いことを見つけ出す可能性にある。著者が望んでいるのは、何時の日か読者が
腰かけて、風に揺れる樹、歩き回る甲虫、池に躍るさざ波を見ていて、大きな疑
問についてのヒントの一片が突然心の中に納まること、である。」と述べている。

これは正に、これまでの何度かに亘る本領域の集会で、演者が生物規範工学のあるべき姿として、皆さんに託して来た望み (Fig. 2) とほぼ同じモノである。しかし、我が国の生物学者の多くは、物理や数学が嫌いだから生物学者になっており、我が国の工学者の大部分は大学レベルの生物学教育を受けたことが無い。この「不」自然科学が作り出す持続「不」可能社会から脱却するためには、次世代の生物学者をもっと物理に強く、次世代の工学者をもっと生物に明るくする必要がある。それが、この国の生物規範工学が先ず到達すべき目標と採るべき道である。勿論、望むだけで現実が変わる訳ではないから、現状を変える作業を始めるしかない。その一つが本書の翻訳出版である。

2. 内容の例示

少し風変わりな、その内容を幾つか紹介する。誰もが一番良く知っている水と空気の物理的な違いは、密度すなわち同じ体積を占める流体の質量である。1 リットルの水は1 リットルの空気の約800倍の質量を持

著名な生物学者J.S.B. ホールデン
の一般向け講演の後で、

信心深いある御婦人の質問：
ホールデン先生！たとえ進化に何十億年も使えたとしても、
たった一個の細胞から、骨や筋肉、神経や心臓、感情を持った脳をそ
なえた複雑な人体にまで辿り着くことが出来るということを、
私はどうしても信じる事が出来ないのです。」

J.S.B.ホールデンの答え：
しかしマダム、
あなたご自身がおやりになったことなのですよ。
それもたったの九ヶ月しかかけずに！

まず、自分自身を含めて、現実には生物がいることを、
我々の技術と学理の大前提にしよう。

物理学崇拝 盲信・妄想)からの訣別：
生物が生き延びている技術 (仕組) から出発して、
自然法則 (原理) を再構築する気概を持とう。

Fig. 2 We are biological existence, and therefore should rely on Biological Sciences as the bases for the sustainable engineering.

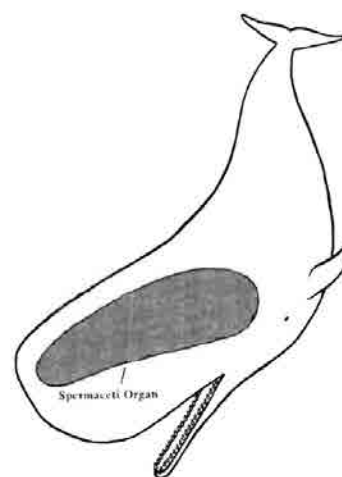


Fig.3 Sperm whale acts as an aquatic "hot air balloon".

っていて、この著しい違いが幾つかの重要な生物学的な結末をもたらす。例えば、魚はヒレを動かすことなしに海底から少し上を漂うことが出来るが、鳥は翼を必死で打たなければホバリング出来ない。熱気球のように空中に浮かぶ陸棲生物はいない。しかし、熱気球として移動する方法を見出した水棲生物がいる。マッコウクジラである (Fig. 3)。このクジラの前頭部には、一匹で 2.5 トンにもおよぶ大量の白濁色の脳油 (鯨蠟) で満たされた器官がある。この脂質の混合物は、33~29°C の範囲でかなりの密度変化を見せる。温度が低くなると脳油は“凍って”高密度になる。この温度範囲における脳油の密度変化は 1~2% で、おなじ温度範囲での水のそれ (約 0.1%) よりかなり大きい。このクジラは脳油の温度を素早く変えることが出来て、その浮力を調節できる。

「拡散」の章には、昆虫で酸素を細胞に送り届けている小さな管は、実は行き止まりの盲管で、能動的には換気できないことが書いてある。この細い盲管 (二次、三次の気管および気管小枝) の一番細いものは、直径がわずか 200 nm しかなく、長さは 1 mm にも達する (Fig.4)。直径が酸素分子の平均自由行程 (約 80 nm) に近い小気管は、拡散輸送効率が低下する。昆虫の飛翔筋では、これらの小さな換気されていない管が、莫大な時間率で周囲の細胞に酸素を供給できなければならない。飛翔中の昆虫の筋肉 1 m³ は、酸素を毎秒 6.5 モル消費する。言い換えると、筋肉 1 m³ 毎に、空気 1 m³ 中にある酸素全てを 1.3 秒で使い果たしている。これらから計算すると、気管の最大長は約 1.2 mm になる。もし昆虫が空気から筋肉までもっと長い経路を持ちたいのなら、拡散だけでは不十分である。これが、大型の昆虫はその主幹気管を能動的に換気しなければならない理由である。O₂ の水中での拡散係数は空気中での 1/10,000 だから、同じ型の拡散に依存した呼吸系は、水中では全く上手く行かない。

「水面波」の章には、水面に浮かんだ物体は、その長さに等しい波長の波を作り出すことが書いてある。波の伝わる速さは波長によって物理的に決まっている。カモな

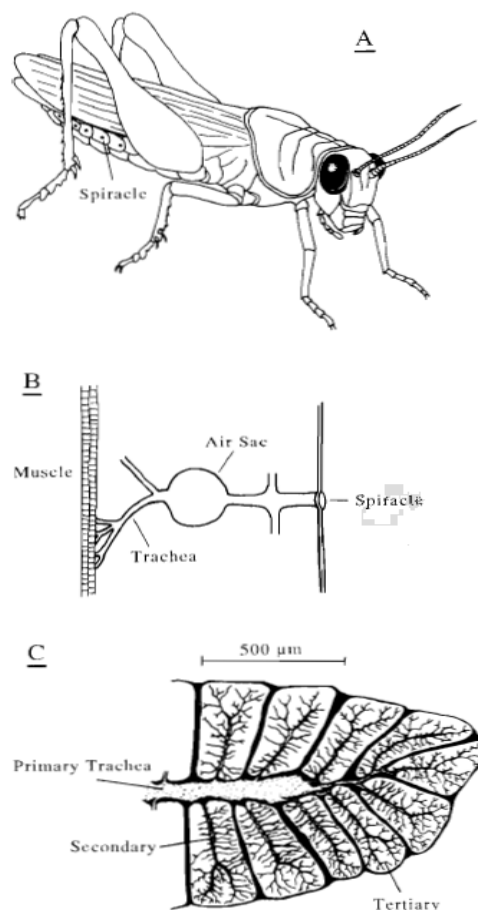


Fig. 4 Spiracle (A), tracheae (B) and further ramification to smaller tracheoles (C).

どの水鳥がその速さ以上のスピードで移動しようとする、自分が作り出した波に自分の体を乗り上げる仕事、すなわち造波抵抗を受けることが説明されている。

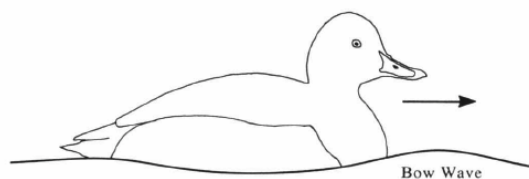


Fig. 5 A swimming duck creates a wave equal in length to the duck's "hull".

「光」の章では、水は空気よりも強く光を吸収するので、光は媒体としての水の中へは比較的短い距離しか入り込めないことが示されている (Fig. 6)。光は 50 m の空気を、強度を全く減らすことなく横切る。しかし、同じ厚さの水を横切れば、強度は著しく減衰する。入射した青色光の 78% だけはまだ残っているが、入射赤色光は実質的に何も残らない。水による光の減衰は、生物に影響を与える。まず、光の急激な減衰は、水棲植物が効率的に光合成出来るのは、水面近くだけであることを意味する。弱い光条件に特化適応した植物でさえ、約 200 m より深いところでは効率的な光合成は出来ない。海洋の平均深度は約 4000 m であるから、光の減衰特性は、地球の水の約 95% を光合成を行う植物の生息域から排除してしまっていることが分る。

3. おわりに

Denny 氏と同じく「何時の日にか、物理に強くなった次世代の生物学者と、生物に明るくなった次世代の工学者が、生物の生きる技術や常温常圧での製造プロセスの秘密を我々の技術に転換できることを願って」、本書の翻訳出版を実現したい。

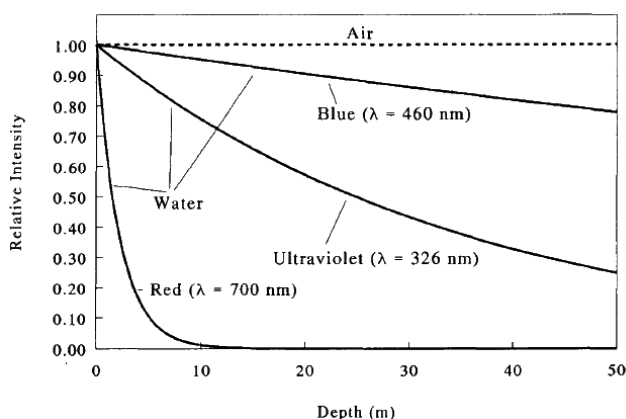


Fig. 6 Visible light passes through 50 m of air un-attenuated, whereas the intensity of light passing through 50 m of water is drastically reduced.

参考文献

- (1) Mark Denny, *Air and Water*, Princeton Univ. Press; Princeton, New Jersey, 1993
- (2) Clerke M. R., The head of the sperm whale. *Sci. Amer.* **1979**, 240(1):128-141

謝辞 演者からの日本語版への翻訳の申し出を快く承諾いただいた Mark Denny 氏に感謝する。

(5) トピックス (PEN より)

空気抵抗低減用のサメ肌模倣リブレット表面構造の “ 耐久性 ” が実際の旅客機の翼で試されている ー バイオミメティクス研究開発の長期動向を垣間見る ー

産総研ナノシステム研究部門ソフトメカニクス研究グループ
研究グループ長 大園拓哉

ルフトハンザドイツ航空（Deutsche Lufthansa AG）が航空機の空気抵抗低減のための表面塗装材の初期検討を開始したことが、2013年2月末頃に Bloomberg Businessweek の Technology 等 で取り上げられた [1,2]。本稿では、表面微細凹凸構造の研究に携わる基礎研究者の視点から、その開発動向について簡潔にコメントする。

記事は、幅 50 ～ 60 μ m、深さ 20 ～ 30 μ m 程度の旧式レコードのようなサメ肌模倣構造を航空機表面に形成し、サメ肌が液体抵抗を下げる効果と同様に、航空機表面の空気抵抗を減少させ、結果的に 1% の燃料削減に至るための実験との内容である。1% の燃料削減は結果的に 9400 万ドル / 年（約 100 億円 / 年）のコスト削減に繋がるという試算があり、これが研究の駆動力となっている。

記事は溝構造を作製する方法についても記述している。この構造は、既存の航空機表面への塗料として位置づけている点を読み取れる。すなわち、塗料として塗り、固める際に上記の溝構造を有した鋳型構造をインプリントすることより、サメ肌模倣溝構造を形成するという。塗料はポリマーとナノ粒子からなるコンポジット材料とあるが、その詳細は公開されていない。今回の記事では、航空機 A340-300

エアバスの翼の十センチ四方部分に上記のサメ肌プリントを施し、その耐久性テストを行うということである。したがって、これは空気抵抗の効果ではなく、飛行機の運用の際に実機に加わる 100℃ の温度変動、機械振動、紫外線、空気からのシア、その他氷結など様々な厳しい条件に対する材料と構造の耐久性に重点をおいた試験評価と読める。目標は、5 年間は機能が保たれる事だそうで、おそらく既存の外環境用塗料型コンポジット材料を発展させ、その耐久性を確かめる実験ということであろう。空気抵抗低減のためには、機体のほぼ全体にコーティングを施す必要があるが、その技術についてはこれから、ということである。

多くの方は今回の記事を、サメ肌の低流体抵抗のアイデアを航空機に応用したという点で、最近盛り上がりを見せている バイオミメティクス（もしくは自然からの学び）の潮流の観点から眺めるかもしれない。しかしながらご存じの方も多いであろうが、このアイデアは航空機技術においてリブレット効果として古くから知られ、また バイオミメティクスを意識した研究も継続して報告されている [3]。微細な凹凸構造の存在により、流体抵抗の原因の一つである渦の成長・剥離を抑えることがポイントとなる。実際に時期や詳細は不明だが、リブレット構造についての摩擦特

性についてボーイング、エアバス社も実機試験をしたという記述が文献にみられる。その表面構造の作製方法は、主にリソグラフィーに基づいており、例えば、ビニルポリマーシート表面に型によって鋸歯構造を形成し、そのシートを機体に張り付けるといった方法が用いられていたようである。これは競技用ボートの船底にも貼られ、その効果が試された。しかし、その作製コストと耐久性の問題で実用には至っていない。よって、このサメ肌技術の航空機応用への現状とは、その抵抗低減効果が大いに期待できると結論できる実績（表に出ていないものも含め）が蓄積されており、その実用化へ向けて、その実機表面に低コストで構造を作製し、同時にその耐久性をあげることで、メンテナンスコストを下げる、という明確な短期技術目標が設定された技術開発フェーズにあると言える。この観点から、今回の記事内容における、「塗料として機体に塗り、その後に型取りー硬化を行うという手法、加えてその材料の耐久性について評価するという実験」は、最終目標に長期的に向かうための、短期技術目標達成への着実な試行錯誤過程といえるだろう。

また、このような長期継続的な活動は、エアバス社のバイオミメティクスを強く意識した開発体制 [4] や、フラウンホーファー研究所との共同開発にも支えられている。エアバス社の HP[4] では、サメ肌をはじめ、ロータス効果による表面濡れ制御技術、生物の変形翼を意識した翼の設計などバイオミメティクスの代名詞的な現象・技術に言及がある。これらの技術開発動向から学べることは、経済的に効率的な技術に達するには、微細構造と抵抗低減効果、という技術だけに注目しては成り立たず、その構造をどう効率的に作るか、どのように修復・取り替えていくか、という技術もセットで考えなければならない、ということであろう。この多面的なアプローチは工学においては当たり前の視点ではあるが、バイオミメティクスの研究開発成果として読み手を引き付けるような記事たらしめるために、「サメ肌を飛行機の翼に」という技術の 1 側面に光を当てたと思える。この傾向は、他のバイオミメティクス技術が論文に掲載される場合にもよく見られるが、今後実用に向かう場合には、多面的な技術の総合的な開発が最も重要な視点であると思われる。実際生物においては凹凸構造の光学的機能と撥水性機能といった構造や機能の複合的機能や、形態形成と自然に帰るプロセスおよび機能すべき時期などはすべて関連しており、その結果生物的効率が最適化されている。よって我々はそのすべてを理解するまでとはいかなくとも、その一部を上手く切り取り理解したうえで、人間の経済活動で採算の合うような技術に結び付けて行ければ、また一歩進んだバイオミメティクス研究の意義が出てくるであろう。

そのために、バイオミメティクスを意識した研究開発においては幅広い領域の技術者・研究者が総合的に技術開発に取り組む枠組み（情報交換の場も含め）があるかどうかの実用化に向けて重要であろう。また、そのなかで厳しい技術的淘汰が行われることも必要であろう。欧米においてこのような動きが活発化しているなか、日本においても周回遅れにならないように、昨年より科研費の新学術領域研究「生物多様性を規範とする革新的材料技術」[5] が組織的に活動を始めた。この研究組織において、今回取り上げた記事にも関連が深い微細凹凸表面構造の様々なトライボロジー効果の研究の組織的な展開も始まっている。私もその一端を担う研究者として活動しているが、単独ではできない組織的な開発成果に今後注目・期待していただきたい。

References :

- [1] Bloomberg Bussinessweek, Technology 2/25 2013
<http://www.businessweek.com/articles/2013-02-25/airplanes-with-sharks-skin-it-may-cut-fuel-burn>
- [2] Lufthansa Magazin 4/2013 pp.60-61.
- [3] B. Dean, B. Bhushan, "Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review" Phil. Trans. R. Soc. A 368, 4775-4806 (2010).
- [4] Airbus HP <http://www.airbus.com/innovation/future-by-airbus/concept-planes/innovating-for-the-future/>
- [5] <http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/>

人工トンボの飛ぶ時代

産総研 生物プロセス研究部門 二橋亮



図1 空を滑空するコシアキトンボのオス



図2 産総研つくばセンター内を素晴らしいスピードで飛翔するマルタンヤンマの成熟オス

筆者が幼稚園の頃、NHKで「トンボになりたかった少年」という番組が放送された。航空力学を専門に研究する東京大学の東昭教授が、トンボの飛翔能力にあこがれ、トンボの飛行メカニズムを調べるとともに、人工トンボを作って実際に飛ばせるという内容だったと記憶している。子供心にも夢のある研究のように思えたが、たしかに大陸を越えて長距離を飛来してくるトンボを見ていると、その驚くべき飛行能力に感嘆することが多い。

トンボを真似たロボットは、その後も国内外で時々開発されている。たとえば国内では、日本文理大学が開発したトンボ型超小型飛翔ロボットの飛ぶ動画が公開されている。屋外の空を滑空する様子は、コシアキトンボ（図1）のような雰囲気を持つ。

<https://www.youtube.com/watch?v=DiNPpQ4MUto>



図3 マルタンヤンマのメスの処女飛翔

先月号のPENに紹介記事の載った、ドイツのFesto社が開発した人工トンボは、4枚の翅を独立に動かすことができ、空中で方向転換やホバリングも自在にできるという点で、実際のトンボにさらに近づいた技術のように見える。

<http://www.canadianmanufacturing.com/design-engineering/news/festo-to-fly-bionicopter-at-hannover-design-eng-99101>

コバルトブルーの複眼や胸部を持つ形態は、日本のマルタンヤンマのような雰囲気を持つ。なお、マルタンヤンマの成熟したオスは、時速約50kmのスピードで飛翔できることが知られているが(図2)、今回の人工トンボの飛ぶ様子を動画で見ると、ちょうど羽化直後のトンボが飛び立つ様子に似ている(図3)。トンボなどの昆虫は、羽化後に翅の細胞の大部分が細胞死して軽くなり、同時に胸部の筋肉が発達することで、素早く飛べるようになるのだが、

人工トンボも現在さらに開発中ということなので、より素早く飛べるモデルが開発されることにも期待したい。

最近、カメラを搭載して空中からの撮影や追跡技術も可能なトンボ型ロボットも発表されている。先日の笹子トンネルの崩落事故では、人が目視で点検しにくかったという問題点が指摘されたが、人が容易に近づけない場所を、トンボ型ロボットを使って空中からリアルタイムに確認する日が、近い将来やってくるかもしれない。

*生態写真は3枚とも二橋亮撮影

FEATURES

寄稿

材料系バイオミメティクス研究の動向と今後の展開

独立行政法人物質・材料研究機構 ハイブリッド材料ユニット 細田奈麻絵

株式会社 LIXIL 分析・評価センター 井須紀文

三菱レイヨン株式会社 横浜研究所 魚津吉弘

株式会社積水インテグレートドリサーチ 佐野健三

独立行政法人森林総合研究所 森林昆虫研究領域 高梨琢磨

独立行政法人海洋研究開発機構 海洋生命理工学研究開発センター 椿玲未

独立行政法人物質・材料研究機構 ハイブリッド材料ユニット ノエマン ピーター ライオシュ

公益社団法人高分子学会 平坂雅男

学校法人千歳科学技術大学 バイオ・マテリアル学科 平井悠司

独立行政法人物質・材料研究機構 先端フォトニクス材料ユニット 不動寺浩

独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 穂積篤

国立大学法人京都大学大学院農学研究科農学部応用生命 森直樹

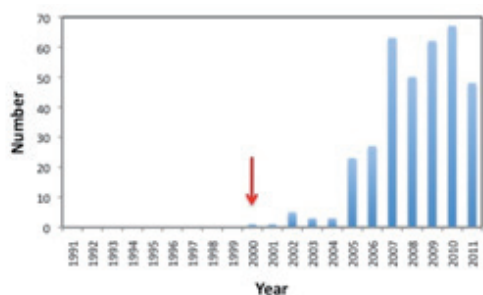
新素材開発の手本としての生物の魅力は、独特な微細構造により元の素材の何千倍もの特性を引き出す機能、自己修復・自己破壊機能（フェイルセーフ機能）、セルフクリーニング機能（機能の効率保持）、低環境負荷（常温常圧）で形を造り出すしくみなど、高効率・高性能・省エネルギーを実現していることである。生物のものづくりの知恵は、今後環境低負荷技術の発展に大きな影響をもたらすものと期待できるところである。

材料系のバイオミメティクスの研究開発は、2000 年前後から急速に活発化している。図 1 にバイオミメティクスの代表的な例である a) ヤモリの接着、b) 蓮の撥水性、c) 蝶の構造色をキーワードにした論文発表数の推移を示した [1]。ヤモリの接着、蓮の撥水性、蝶の構造色など全く異なるテーマにも関わらずほぼ同時期に論文数が急激に増加している事が分かる。図中の矢印は研究のキーとなっている論文が発表された年である。いずれの場合も生物の機能についての発見でその後 5 ～ 6 年後に論文数が急激に増

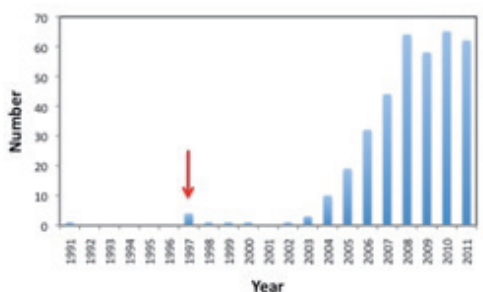
加している。主題分野別に見ると（図2）材料科学分野での論文数が多くを占めておりこの分野での波及効果が大きかったことが分かる。

バイオミメティクスの研究開発の起点が生物の機能の発見と深く結びついていることから、生物学の研究の現状を知ることが重要である。バイオミメティクスの国際標準化を進める ISO/TC266 Biomimetics (ISO/TC 266) の国内審議委員会のワーキンググループ2 (WG2) 対応分科会は、

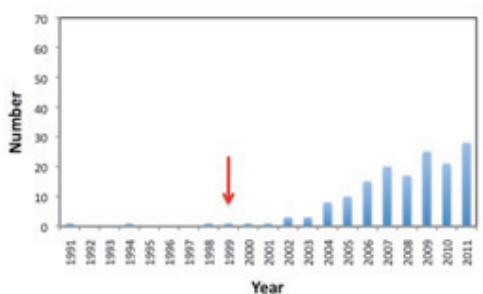
バイオミメティクスの研究開発の推進を目的に、バイオミメティクスのモデルになり得る生物と注目されている機能について調査し、応用が期待される産業分野についてまとめた。その結果を表1に示す。ここでは、バイオミメティクス研究開発のモデルとなり得る生物を151種類ピックアップし、全体を8つのカテゴリーに分類している。8つのカテゴリーとは：1) 材料、2) プロセス、3) セルフX、4) センサー、5) 流体力学、6) 省エネルギー・省資源、7) 環境適応性、8) 行動・生態である。カテゴリーにはそれ



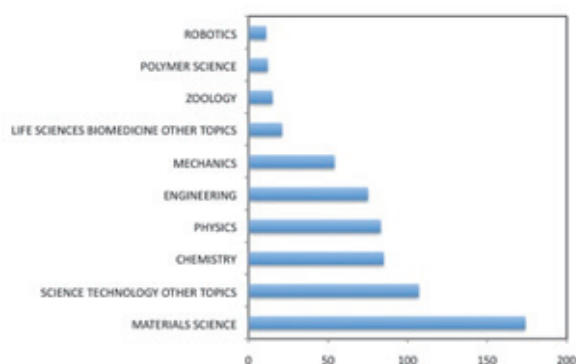
a) 発表論文数(キーワード: Gecko, adhesion)



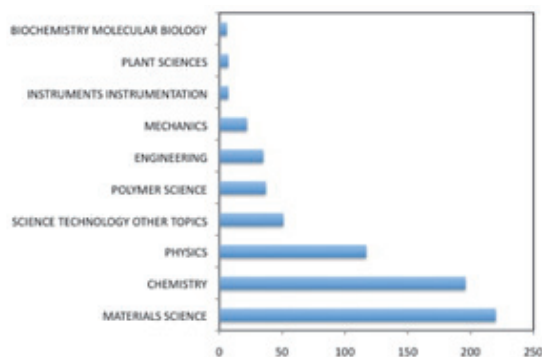
b) 発表論文数(キーワード: Lotus, hydrophobic)



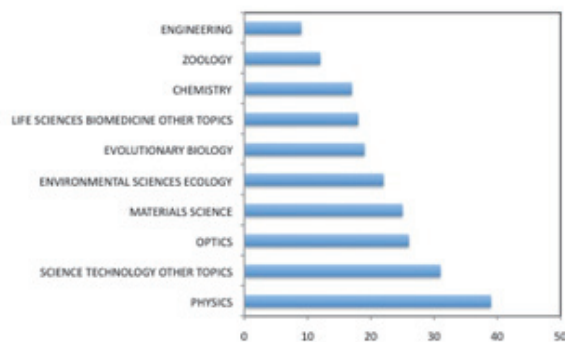
c) 発表論文数(キーワード: Butterfly, structural color)



a) 主題分野別に見た論文数(キーワード: Gecko, adhesion)



b) 主題分野別に見た論文数(キーワード: Lotus, hydrophobic)



c) 主題分野別に見た論文数(キーワード: Butterfly, structural color)

図1 キーワードで検索した発表論文件数の変化。データベース：web of science。

図2 主題別に見た論文数。データベース：web of science。

ぞれ生物の特徴的な機能をリストアップし、56 種類の具体例を紹介している。WG2 対応分科会では、バイオミメティクスが今後影響をもたらす産業分野が 43 種類にも及ぶと予測し、表 1 にまとめている。この分野の広範囲な産業への影響を伺い知ることができる。

また、バイオミメティクス研究において利用される分析方法の例についても目的別にまとめ、その内容を表 2 に記載

している。

生物をモデルとしたバイオミメティクスの研究開発によって、生物学研究の事例を知ることが重要である。しかしながら、ものづくりに携わるエンジニアにとって、生物学は異分野であり融合的な研究を進めるにあたってはまだまだ障壁が高いのが現状である。ISO/TC266 のワーキンググループ 4 では生物に関する研究のデータベースと工学的な

表 1 生物の機能と期待される応用分野。目的別の分析方法

Category	Performance	creatures	Purpose of analysis							expected applications
			Morphology/Structure	Mechanical Properties	Optical Properties	Physical Properties	Chemical/Elemental Characterization	Behavior Analysis	Biological Characterization	
Materials	Optics, anti-reflection, structural color, condense rays of light	morpho butterfly [2], moth eyes [3], blue damselfish [4], maranta [5]	◇	◇	◇			◇	◇	liquid crystal, decoration, electronics, functional film, cosmetics
	Luminescence	fire fly [6], squid [7], jellyfish [8]	◇	◇			◇			automobile, household electric appliances, decoration
	lightweighting design	bamboo [9], plant stem [10], boxfish [11], diatom [12], bone [13]	◇	◇						architecture, automobile, structural material
	wettability	lotus [14], land snail [15], wings of butterfly [16], wings of cicadas [17], rose [18], namib desert beetle [18], pitcher plant [19,20]	◇		◇		◇	◇		texture, coating material, architecture, automobile, glass, water harvesting, (marine industry)
	Mechanical properties	abalone [21], bone [13], tree [22], bamboo [23], spider silk [24]	◇	◇	◇				◇	texture, architecture, medicine, sports industry
	Dynamics of a bistable	venus flytrap [25], paradise bird [26]		◇			◇		◇	architecture
	adhesion	blue mussel [27], gecko [28], leaf beetle [29,30,31], land snail [32], burdock seeds [33], octopus suckers [34], sea urchin [35], slime mold [36]	◇	◇	◇		◇	◇	◇	architecture, medicine/manufacture
	Fluid dynamics	shark skin [37], dolphin [38], bluefin tuna [39], penguin [40], bird [41], dragonfly [42], maple seeds [43]	◇	◇	◇			◇		aircraft, ship, household electric appliances, coating materials, sports industry
	electrical properties, isolator, electricity generation	electric eel [44], dried shells [45], dried trees [46]				◇	◇			ceramic industry, electric industry
	impact absorption	Pomeio [47], cashew [48], joint [49], rhinoceros beetle [50]	◇	◇						automobile, medicine, defense industry
process	bio-template	tobacco mosaic virus [51], DNA [52], wings of butterflies [53], spirulina [54]	◇		◇		◇		◇	electronics, semiconductor industry
	tube structure	mosquito [55, 56, 57, 58, 59], butterfly [60, 61, 62, 63, 64], wharf roach [65]	◇	◇	◇		◇			medicine
	surface tension	whirligig beetle [66], backswimmer [67]	◇		◇	◇				coating materials
	unidirectional	mouth of snake [68] earthworm [69], bee [70], pitcher plant [71]	◇	◇			◇			machine parts
	bio-mineral	shells [72, 73], locust [74], bone [75], diatom [76]		◇			◇			medicine, decoration, ceramic industry
	photosynthesis	plant [77]								energy industry, agriculture, food industry
	organic synthesis	spider silk [78], blue mussel [79], plant root [80], pine tree [81]								medicine, chemical industry
	proteolysis	silkworm [82]								civil engineering
	nanocatalyst	cellulose degradation [83], silk [84], amino-acid fermentation [85], alcohol fermentation [86], amphotericity [87], microencapsulation [88]					◇		◇	food industry, energy industry, plastics industry
	micro-mimic	bombardier beetle [89]								machine parts, internal-combustion engine
life	thermo-stable	leaf roll [90]	◇	◇						coating materials, nanotechnology
	self-healing	poplar [91]	◇	◇						household electric appliances
	self-regeneration	eggworm [92]		◇	◇	◇				medicine, electronics, film
	self-healing, self-repair	skin [93], bone [94], teeth [95], blood [96], pulp tissue [97, 98], shrimp shell [99], aluminum [100]					◇			medicine, coating materials, automobile, electronics, household electric appliances
	self-assembly	self-manufacture [101]	◇							medicine, coating
	self-shedding	blue leaf [102], mandarin [103], wings of butterfly [104], wings of cicadas [105]					◇			architecture, automobile, coating materials
	self-shedding	wingless [106]	◇	◇						soar

Category	Performance	Inspirations	Purposes of analysis							Expected applications
			Morphological Features	Mechanical Properties	Cybernetic Properties	Physical Properties	Chemical/thermal Characteristics	Behavioral Aspects	Biological Aspects	
Sensor	Outer vision/ visible light, infrared, specific wavelength	eyes [100], compound eyes [101], photoreceptor in vision of fish star fish (sea lamp - arthropods) [102], ommatidia beetle [103], cuticulae and butterfly [110]	+	+	+		+	+	+	sensor, architecture, household electric appliances, automobile, aircraft
	olfaction	ant [111], dog [112], insect [113], deep-sea fish [114]	+					+	+	sensor, household electric appliances, automobile
	tactile sensor, phototactoreceptor	cat whiskers [115], gravity sensors of plant [116]	+	+				+	+	sensor, household electric appliances, automobile
	hears sensation	ant [117], fly [118], bee [119]	+					+	+	sensor, food industry
actuator	acoustic sensor ultrasonic waves, low frequency	bats [120], frog-like beetle [121], shrimp [122], gecko [123]	+					+	+	aircraft, sensor, agricultural control
	mechanical sensor	inflammatory bird [124], sea urchin [125], pigeon [126], spine lobster [127], shark [128], honeybee [129]	+						+	aircraft, sensor, etc
	force sensor	cricket [130]	+	+				+		sensor, household electric appliances
	biocatalysis	muscle [131], cuttlefish [132], jellyfish [133]	+							etc
Hydrodynamic	fl	wings of bird [134], dragonfly [135]	+							aircraft, power generation
	swimming force	jellyfish [136], pufferfish [137]	+					+		rope industry
		shark skin [37], dolphin [38], herring fish [39], porcupine [40], koi fish [138], bottlefish [139], wings of owl [139], ant [140]	+	+						
	fluid resistance		+	+						etc, sports industry, automobile, aircraft
saving energy, saving resources	friction control	snake [141, 142, 143], sand shark [144], cat [145]	+	+						machine parts, robot industry, automobile, medicine, warfare
		shells of trees [146], polar bear [147], snail [148], shark cuticula [149], seahorse [150], ant [151, 152], mammalian sweat [153], transpiration [154]	+			+	+			architecture, house, automobile
	temperature control	ant [155]	+			+	+			architecture, house, automobile
	radiation control	ant [156]	+			+	+			architecture
Advantage to the environment	disassembly/assemblability/ adaptability for recycling, reusability	beetle ant [157], leaf fish [158], frog [159], butterfly [160]					+			design industry, agriculture
	calculation technique	ant network [161], chromosome [162], cicada [163]	+					+		medicine, house
	solid translation	polar bear [164], Transmembrane Pore [165], Transmembrane [166], vesicle [167]	+			+	+			medicine, food industry, battery
	solid to solid transition	helicobacter pylori [168, 169], molecules in submarine volcano [169], bacteria in hot spring/Mineral [169]						+		fuel cell
High-temperature tolerance		microbe in submarine hydrothermal polymetallic ore [169]					+			
	High temperature anti-ultraviolet resistance	Acropora [170], baroque [171], melanophyll beetle [171]					+			sensor
		echinacea [172]	+	+		+		+		cosmetics
		codace [173, 174, 175, 176], butterfly [177, 178], squid [179, 180, 181], chameleon [182, 183], insects like dead leaves [184], grasshopper [185, 186, 187], mantis [188], katydid butterfly [189, 190], beetle eggs [191]	+			+		+		defense industry, decoration, pet control
Behavior Ecology	memory, color, shape, chemical communication	sephoid nose [192, 193], cuttlefish [194, 194], fish's fin [195, 196]	+	+			+	+		robot industry, machine parts, tool
	manipulation	school of fish [197], flock of birds [198, 199], seedling [200], magpie bird [201, 202]						+		aircraft, automobile
	energy saving	swarm of bees [203, 204], ant [205, 206, 207], ball [208]					+	+		aircraft, automobile
	clash avoidance						+	+		aircraft, automobile
	navigation	snail [209, 210], ant [209, 210]					+	+		agriculture, food industry
	activity	forefly [211], colony of social insects [212]					+	+		agriculture, food industry
	nutrient supply	spider silk as predator silk [213], locust silk [214]					+	+		basic medicine, agriculture
	defense	goat [215], school of salmon [216], school of striped catfish [216]						+		design, decoration

表 2 研究目的別の分析方法

Purposes of analysis							
Morphology/Structure	Mechanical Properties	Optical Properties	Physical Properties	Chemical/Elemental Characterization	Behavior Analysis	Biological Characterization	Biological activity
OEM	mechanical test	spectrophotometer	contact angle meter	NMR	high speed camera	HPLC	GCAD
SEM	viscosity/viscoelasticity measuring instruments	confocal laser scanning microscope	thermal conductivity meter	IR	computer simulation	LC-MS/MS	HPLC
TEM	nano, micro indenter	fluorometer	impedance analyzer	mass spectroscopy	wind-tunnel tests	DNA sequencing	LC-MS/MS
SPM	vickers hardness test	polarization measuring instruments	DTA	X ray	special equipment	MALDI-MS	GC-MS/MS
X-ray, CT	pencil hardness	reflectometer	DSC	Raman	video analysis	amino acid analyzer	
tomography	AFM friction force microscope	UVVIS	sound meter	XPS	behavior analysis		
SIM	SPM	ellipsometer	frequency analyzer	TOF-SIMS			
confocal laser scanning microscope			magnetism	FX			
multiphoton excitation fluorescence microscope			air capacity	SEM-EDS			
			measurement of moisture content	SIMS			
				AES			
				neutron scattering			
				zeta-potential			
				GPC			
				GC			

研究のデータベースを融合し生物モデルを探し易くする取り組みが進められている。こうしたツールの整備により今後はバイオメティクスへの新規参入がし易くなる可能性がある。新規参入の容易化はバイオメティクス製品開発を加速させ、広範囲な分野に浸透していく可能性を秘めている。バイオメティクスはもともと持続型社会を支える環境低負荷技術のポテンシャルを有していることから、環境にやさしい技術の発展に今後広く影響を及ぼすことが期待される。

References :

参考文献リストはポータルサイト PENGIN 掲載版でご確認ください。

(6) 国内外研究動向紹介

日本化学会第94回春季年会 ATP セッション 新材料開発最前線 「連携が支えるバイオミメティクス」に参加して

2014年3月27日名古屋大学で日本化学会春季年会のATPプログラム新材料開発最前線の一日目に、「連携が支えるバイオミメティクス」のセッションが開催され、生物学者から産業界のメンバーまで30分の昼休みを挟んで丸一日かけて講演・議論が繰り広げられた。その中で私は午前中の模様をレポートする。

午前中は、新学術領域「生物規範工学」下村政嗣領域代表よりセッションの趣旨説明に続き、5件の依頼講演と1件の招待講演があった。

趣旨説明では下村先生より次のような話があった。

「これまで進めてきた新学術領域での取組み、高分子学会でのバイオミメティクス研究会や国際標準化への取組みに加え、バイオミメティクス活用を加速することを目的とした新たな仕組みを創ろうとしている。ただ、バイオミメティクスの活用推進のためには、異分野間の連携、産官学の連携が重要になってくる。このセッションでは連携の重要性を確認するとともに、新たな連携の可能性に関して議論を進めていきましょう。」

最初の2件の講演は材料系の講演であった。1番目の講演は名工大とLIXILの連携による有機-無機ハイブリッドの中で分子鎖の方向性を制御し、熱伝導度の異方性を出していた。2番目の講演は下村教授のグループとトヨタ自動車との連携によるもので、大学の得意技である自己組織化を利用したハニカム形成プロセスを応用して色々な形状を表面に付与して、形状と摩擦特性との関係を調べ、摩擦を下げるために有効な形状を確認するという内容であった。

次からの2件は昆虫の特性を把握するというベーシックな研究に関する講演であった。まず1件目は、森林総合研究所の高梨氏のグループを中心に多くの官学が連携した研究に関する発表であった。昆虫の振動に対する反応性を確認し、植物に特定の振動を与えることによりその植物に昆虫が付きにくくし、その昆虫から植物を保護することを目指したものである。2件目の発表は、北大電子研の西野先生の講演であった。生物学者として昆虫の聴覚器の構造と機能に関する研究発表であったが、それらの結果をもとに他分野の研究者との連携を呼びかけるものであった。

5件目の講演は名大医学部の小林先生の講演で、細胞が力学的刺激や周辺の

基質の硬さを感知するシステムに関する研究の発表であった。これらのシステムを連携して考察することによって、各種センシングへの応用ができるのではないかと提案があった。

午前中最後の講演は、浜松医科大学の針山先生のグループを中心として展開されている「ナノスーツ」に関する招待講演であった。「ナノスーツ」は新学術領域のメンバーの連携により見出された技術であり、生きたままの昆虫や生体を SEM での観察を可能とする技術である。バイオミメティクス連携の最大の成功例の一つであり、この技術は工学的応用のみならず医学的な応用等様々な方面への適用が大いに期待されるものである。

工学者、生物学者、医学者など多岐に渡る演者の多くの学術領域をまたがった連携の成果や連携への模索のお話を聞き、私も含め聴講者の皆さんは非常に多くの刺激を受けたものと思われる。バイオミメティクスを用いて工業技術を作り上げるには、多くの学術領域の知識を活用する必要があり、異分野の専門家の連携が必須である。この異分野連携の枠組み形成のために、生物規範材料の新学術領域は有効に機能していると実感することができた。上手く連携することで、一つでも多くの成功事例を積み重ねていきたいものです。

日本化学会第 94 春季年会アドバンスト・テクノロジー・プログラム (ATP)「連携が支えるバイオミメティクス」に参加して

株式会社豊田中央研究所 先端研究センター 中野 充

3 月 27 日 (木) ~ 30 日 (日) の 4 日間、名古屋大学東山キャンパスにて、日本化学会第 94 春季年会が開催された。ATP「連携が支えるバイオミメティクス」は初日 (27 日) のみの開催であったが、講演数 14 件と盛り沢山であった。出席者は、時間を追って尻上がりに増加し、活発な討議が繰り広げられた。本稿では、午後の部の講演について紹介する。

◆ 「バイオミメティクスの産業応用 -世界動向と日本の課題-」 平坂雅男氏 (高分子学会)

バイオミメティクスの産業応用について、欧州の取り組みを中心に紹介された。特にドイツはこの分野を先導しており、2001 年に設立した BIONIKON (Bionic Competence Network) を中心に、産官学連携が活発に進められている。2013 年に開催された世界最大の見本市ハノーバー・メッセでは、各国首脳が見守る中トンボ型ロボット (FESTO 社) が公開され、大きな話題を呼んだ。その他、やや後発であったフランスも、CEE BIOS という拠点を設立し、研究と産業応用の加速を図っている。日本では、バイオミメティクスを学術研究として見る向きが多いが、国際標準化 (ISO) 活動も 2012 年から始まっており、より一層の産学連携が求められている。

◆ 「生物機能を工学技術に転用する支援方法 -バイオ TRIZ という考え方-」 山内健氏 (新潟大工)、小林秀敏氏 (阪大院工)

◆ 「バイオミメティック・オントロジーの試作と利用」 古崎晃司氏 (阪大産研)

生物の叡智を工学に転用したい、と切望する研究者、技術者は少なくないが、現実には、ふたつの学問領域の隔たりは予想以上に大きい。まず山内氏からは、バイオ TRIZ という手法が紹介された。従来の TRIZ が、既出願特許に基づいた発想支援法だったのに対し、バイオ TRIZ は「生物が採用している問題解決方法」が発想の源となっている。作成には、非常に多くの労力を要するが、生物学と工学を結ぶ有益なツールになることが期待される。次の古崎氏からは、検索のためのオントロジーが紹介された。ほとんどの工学者にとっては、例えば、ある生物学用語の上位概念を示す言葉が何か、ということすら分からない。生物学と工学の用語/概念をつなぐバイオミメティクス・オントロジーの構築は、バイオ TRIZ と並び、バイオミメティクス研究開発全体を支える上で、

不可欠な基盤と言えよう。

- ◆ 「マイクロマシニングによる RGB 構造色材料の製作」 金森義明氏（東北大院工）
- ◆ 「ヤモリ模擬粘着剤におけるミクロ材料力学と接着・剥離のスイッチング」 山口哲生氏（九大院工）

構造色と（接着剤を使わない）接着は、バイオミメティクス材料研究の代表的な題材である。金森氏は、石英基板上にサブ波長周期のシリコン 2 次元格子を並べることで、赤、緑、青それぞれの波長域にピークを有する三原色フィルタの作製に成功した。本フィルタは、「入射波長より短い周期をもつサブ波長格子は、高次回折波を発生しない」という原理を利用した構造色である。次いで山口氏からは、ヤモリの足を模倣した接着について報告があった。山口氏は、従来十分考慮されてこなかった曲り梁構造に着目し、材料力学的な検証を行った。ヤモリの接着挙動の異方性を再現できたことはもちろん、数式化できたことで原理に迫った点が特に優れていた。生物の特異な現象・挙動を、モデル化（定式化）することは、学術的に普遍性を高めるだけでなく、産業応用する上でも必須のプロセスだと考えられる。

- ◆ 「低摩擦材料としてのモスアイフィルム」 魚津吉弘氏（三菱レイヨン）ほか
- ◆ 「水滴の自己組織化を利用したハニカム状高分子フィルムの作製とその応用」 山崎英数氏（富士フィルム）ほか

産業界からは、上記 2 件が報告された。三菱レイヨンのモスアイフィルムは、蛾の複眼のナノパイル構造を模した反射防止膜で、商業化に最も成功したバイオミメティクス技術のひとつである。一方ナノパイル構造は、生物の様々な部位で認められる普遍性の高い構造である。魚津氏らは今回、針山氏（浜松医大）、石井氏（名古屋工業大）らの協力を得て、モスアイフィルムの低摩擦性を見出した。蟻を初めとする節足動物はいずれも、モスアイフィルムを貼り付けた基板から滑落することが分かった。また山崎氏らは、下村氏（東北大）のグループの技術（水滴をテンプレートとした自己組織化）を基に、ハニカム状高分子フィルムの大面積化に成功した。本フィルムは現在、細胞培養の足場材料等に展開されている。

- ◆ 「細胞はいかにして足場の硬さを感知するのか」 曽我部正博氏（名大院医）

身体を構成する細胞は、居場所（基質）の硬さを感知することができ、その機能は「細胞力覚」と呼ばれる。細胞力覚は、実感されない力覚であるが、細胞の生死、増殖、分化、運動を調節して命を支えている。具体的には、接着斑近傍に生じた力によって、

細胞の機械受容チャネルが開口し、その結果細胞内の Ca^{2+} 濃度が変化する。曾我部氏らは、硬度の異なる基質境界に差し掛かったとき、 Ca^{2+} 振動が活発になることを見い出した。生命体における微小信号のセンシングは、産業応用上、非常に魅力的であるが、部分に捉われずセンシングシステム全体として学ぶことが重要だと考える。

非常に充実した 1 日であった。今後は、生物学、生命科学の研究者にもっと多く参加していただき、意見交換できると更に良いと感じた。またそのためにも、バイオメティクスが、私たち工学系研究者・技術者にのみ利益がある営みではなく、生物学者にとっても価値ある活動であることを積極的に示すべきだと思う。知人の生物学者が、「生物の構造と機能の関係は、進化を考察する上でもとても有益だが、どう調べればいいのか分からない」と話していたことを思い出す。次年度以降、本プログラムが益々発展することを、心より祈っている。

14-1 バイオミメティクス研究会レポート

滋賀県立大学 星野敬子

2014年6月30日、産業技術総合研究所臨海副都心センターにおいて、14-1 バイオミメティクス研究会が開催された。高分子学会バイオミメティクス研究会、及び ISO/TC266 バイオミメティクス国内審議委員会の共催で継続されている本研究会は、今回三つの主題をもとにしていた。

一つ目は「バイオミメティクス推進協議会」である。同日同会場で、バイオミメティクスの産業化を推進する産学官連携のプラットフォーム、NPO 法人バイオミメティクス推進協議会が設立された。高分子学会バイオミメティクス研究会運営委員長の下村政嗣氏が開会挨拶を通じて本協議会の設立を報告し、高分子学会事務局長の平坂雅男氏が、本協議会の必要性及び役割などを発表した。主な活動は、バイオミメティクスに関する製品開発やコンサルティング、調査・研究、教育・普及の他、政策提案などを予定している。

二つ目の主題は「情報科学による工学と生物学の融合」である。まず、北海道大学名誉教授の下澤楯夫氏が「バイオミメティクス画像検討会」（科学技術振興機構 CREST プログラム）で得られた成果について発表した。本検討会は、主に昆虫体表の微細構造について、生物学者と工学者が意見交換を行う場である。その成果の一つとして、エゾハルゼミ翅の機能等が紹介され、生物学を基盤に持つ工学の強みなどが強調された。

続いて、北海道大学情報科学研究科教授の長谷山美紀氏が、バイオミメティクス画像データベースを発表した。バイオミメティクスの研究開発においては、膨大な生物学データを工学へとつなぐ発想の支援が重要な鍵となる。生物学的な情報が画像の類似性によって関連づけられ、新たな価値を創出する発想支援型の検索基盤が紹介された。

その後、北陸先端科学技術大学院大学教授の溝口理一郎氏が、情報検索の手法として、オントロジーで補強されたシソーラスの有用性を発表した。得たい情報にたどり着くためのキーワードを見つけることを手助けし、生物学と工学の橋渡しに役立てるシソーラス、そしてその利用環境の構築が紹介された。

三つ目の主題は「バイオミメティクスが橋渡す環境地域国際連携」である。筆者は、フランスのサンリス市らが取組むバイオミメティクス研究開発拠点

CEEBIOS と、滋賀県の産官学が連携して設立された NPO 法人アスクネチャー・ジャパンらが三度に渡る交流を行い、日本とフランスにおける地域連携について討議した過程を紹介した。

最後に、富士通総研長谷川誠氏が、環境省「平成 25 年度自然模倣技術・システムによる環境技術開発推進検討業務」の成果を発表した。有識者検討会を設置し、自然模倣技術・システムの体系化やデータベースの作成、新規事例の創出や実社会への応用手法について検討した内容が報告された。

本研究会のプログラムは以上である。NPO 法人バイオミメティクス推進協議会の設立を機に、新ビジネスの創出、国際標準化、国際連携、地域連携、博物館連携などを通じて、日本がさらにこの分野を推進・発展させることを期待する。

(7) 新聞・報道

【新聞・報道】

総括班

(1) 河北新報 web 版 (2014 年 4 月 8 日)

4 月 8 日付けの河北新報 web 版の記事、「優れた機能、産業に応用／生物のデザイン力に学べ！」において、3 月 28 日に開催された東北大サイエンスカフェでの領域代表の講演内容が紹介されました。

記事はこちら：

http://www.kahoku.co.jp/special/spe1097/20140409_01.html

(2) 日刊工業新聞 (2014 年 4 月 4 日)

4 月 4 日の日刊工業新聞の記事、「生物模倣技術」を産業化－8 月に産学で NPO 法人設立」において、領域代表のコメントが紹介されました。

記事はこちら：<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0820140404cbad.html>

(3) 中日新聞 (2014 年 5 月 12 日)

5 月 12 日の中日新聞の記事、「製品に生きる生物の形 世界規格作りに機関設立へ」において、領域代表のコメントが紹介されました。

記事はこちら：

<http://www.chunichi.co.jp/s/article/2014051290091320.html>

(4) FM TOKYO (2014 年 3 月 24 日)

2014 年 3 月 24 日(月)～27 日(木)放送の FM TOKYO 「未来授業～明日の日本人たちへ」において、

「下村政嗣氏 ～生物をまねて、サステナブルな価値を創造する「バイオミメティクス」の可能性」が放送されました。

詳細はこちら：

<https://www.blwisdom.com/linkbusiness/linktime/future/item/9544-98/9544-98.html?limitstart=0>

(5) 日経テクノロジー on line (2014 年 7 月 1 日)

下村政嗣先生、平坂雅男先生（総括班）の記事が日経テクノロジー on line に掲載されました。

【新聞記事】生物模倣技術のビジネス展開を推進、研究者や企業人らが NPO 法人を設立

<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20140701/362231/?bpnet&rt=nocnt>

（6）日経 BP （2014 年 7 月 2 日）

下村政嗣先生、長谷山美紀先生、平坂雅男先生、針山孝彦先生（総括班）の記事が日経 BP 社 知財 Awareness に掲載されました。

バイオミメティクス研究会、実用化促進に向けた NPO を設立へ

<http://chizai.nikkeibp.co.jp/chizai/etc/20140702.html>

（7）日本経済新聞（2014 年 7 月 15 日）

2014 年 7 月 15 日付の日本経済新聞で、生物模倣技術が紹介されました。

「新製品ヒント 生物の体に」

B01-4 班

（1）NHK、常陽新聞、茨城新聞、東京新聞、日本経済新聞、毎日新聞、読売新聞、朝日新聞（2014 年 04 月 16 日）

奥田隆先生(B01-4 班)のネムリユスリカを使った宇宙実験が報道されました。独立行政法人 農業生物資源研究所は、ネムリユスリカを使った宇宙での微小重力影響実験において、微小重力下で乾燥幼虫が蘇生することをプレスリリースしました。若田宇宙飛行士が「きぼう」日本実験棟でネムリユスリカ乾燥幼虫の蘇生実験を行っ結果、微小重力下でも幼虫は吸水後に活発に動き出し2週間後には蛹と羽化した成虫が観察され、ネムリユスリカが宇宙生物学実験の生物材料として有用であることが再認識できました。これらは、奥田隆先生（B01-4 班）による研究成果です。

<http://www.nias.affrc.go.jp/press/2014/20140415/>

B01-5 班

(1) TBS (2014 年 6 月 22 日)

千葉大学の田中 博人 先生 (B01-5) が TBS テレビ番組「未来の起源」の取材を受け、下記の予定で放映されることになりました。

日時：6/22 Sun. 23:04-23:10

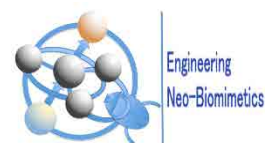
番組名：未来の起源 (<http://www.tbs.co.jp/program/mirainokigen.html>)

チャンネル：地上波 TBS (関東地域 愛知県 三重県 岐阜県)

公募班

(1) 北海道放送 (2014 年 5 月 3 日)

北海道放送「報道特集」地方ニュースで、北海道大学総合博物館で開催されたバイオミメティクス・市民セミナーが紹介され、Olaf Karthaus 先生 (公募班) の「花粉を真似た材料」が放映されました。



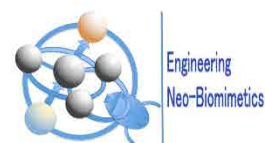
(8) アウトリーチ活動

【アウトリーチ活動報告】

(1) 計画班B01-2班(針山総括)の不動寺浩班員は平成26年度 NIMS キッズの実験工房において「アルコールに漬けると色が変わる模倣タマムシ」の展示を行いました。

ナノテクノロジーを用い、生物をまねた(バイオミメティック)新材料の展示で、模倣タマムシの構造色がアルコールに浸すと変色する様子をご子供達と観察します。

<http://www.nims.go.jp/publicity/events/open-house/h26.html>



(9) 各種案内

福岡で開催される、15th IUMRS-ICA (International Union of Materials Research Societies, International Conference in Asia) において Materials Technology Inspired by Natural Phenomena and Natural Materials のセッションが企画されます。

<http://www.iumrs-ica2014.org/index.php>

http://www.iumrs-ica2014.org/symposia/symposia_A-3.php

「生物規範工学」も協賛しておりますので、奮ってご参加願います。申し込み要旨締め切りは、2014 年 2 月 5 日です。講演申し込みは下記サイトよりお願いいたします。

<http://www.iumrs-ica2014.org/cfp.php>

新潟で開催されるプラスチック形成加工学会 成形加工シンポジウム'14 の特別セッションにおいて「自然に学ぶ成形加工」が開催されます。

日時：2014 年 11 月 14 日(金)～15 日(土)

会場：新潟市 朱鷺メッセ

主催：プラスチック形成加工学会

オーガナイザー：魚津吉弘（三菱レイヨン）、奥崎秀典（山梨大学）、三俣哲（新潟大学）

特別セッション III 「自然に学ぶ成形加工」

要旨：

持続可能社会の実現を目指して、ネイチャーテクノロジーやバイオミメティクスと呼ばれる自然に学ぶものづくりが、再び脚光を浴びています。以前より注目されてきた人工筋肉などのアクチュエータやセンシングなどに代表されるロボティクスを指向した機械系分野や人工光合成や人工酵素などの化学系分野は現在でも活発に取り組まれています。一方、近年電子顕微鏡技術の進化をベースに進展が著しいナノテクノロジーを駆使し、蛾の眼の反射防止機能、蓮の葉の撥水機能に代表される生体表面のナノ・マイクロ構造に学ぶ材料系分野での研究も盛んになっています。しかしながら「自然の技術体系」を実際に工学技術に移転できた例はわずかです。様々な分野の研究者が集う当学会において、自然に学ぶプラスチック材料の設計・開発の可能性について議論を行いたいと考えています。

詳細：<http://www.jspp.or.jp/kikaku/sympo/index.html>
<http://www.jspp.or.jp/kikaku/sympo/contents32.html>

第 15 回構造色シンポジウムが下記の概要で開催されます。

- ・ 日時：2014 年 11 月 15 日(土) 午後
- ・ 場所：東京大学本郷キャンパス 工学部 3 号館 4 階 423・424 会議室
(〒113-8654 文京区本郷 7-3-1)
- ・ 交通アクセス：

http://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam01_04_03_j.html

- ・ 参加費：無料

発表・参加の申し込みは、下記シンポジウム HP よりお願いいたします。

<http://mph.fbs.osaka-u.ac.jp/~ssc/sympo2014/sympo2014.html>

11月27日～11月28日に那覇市において JAMSTEC の国際海洋環境情報センター（GODAC）で JAMSTEC との合同シンポジウムを予定しています。

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

魚津吉弘 (三菱レイヨン(株) リサーチフェロー)

モスアイフィルムの 意外な可能性

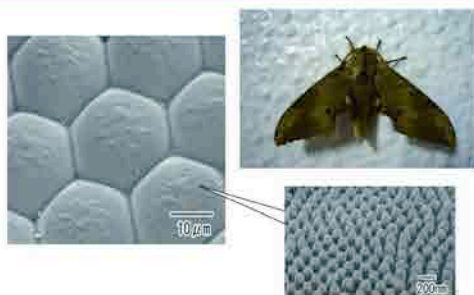
2014年4月5日 (土)

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

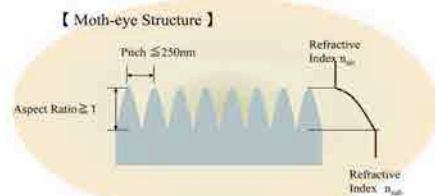
時 間：午後1時30分から午後3時30分



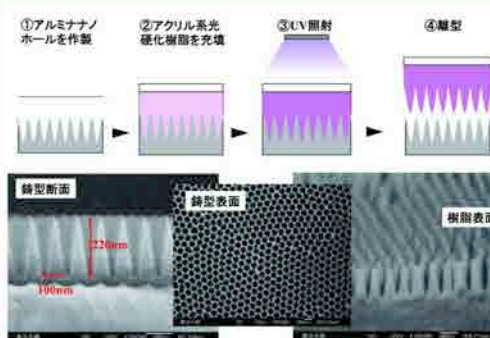
モスアイ形状は100nm程度のナノパイル構造からなり、理想的な反射防止性能を有しているため、蛾の目を模倣したバイオミメティクス材料の代表例とされています。その構造は反射防止だけでなく超撥水や超親水性能を発現します。研究を進めていく中で、昆虫類がその表面に付着することができないことも確認されてきました。この特性は害虫のコントロール技術への適用が考えられ、農業分野・建築分野への展開も期待されています。



蛾の目の表面構造



狙いのモスアイ構造



モスアイの反射防止フィルム作製プロセスの模式図

主 催：北海道大学総合博物館
共 催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
高分子学会北海道支部
北海道大学総合博物館
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目
問合せ先：TEL 011-706-2658 FAX 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

Olaf Karthaus (千歳科学技術大学 教授)

花粉を真似た材料

2014年5月3日(土)

会場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時間：午後1時30分から午後3時30分



皆さんは「花粉」と聞くとどんなことを思い浮かべますか。自分に関わりがあるとしたら“花粉症で悩まされる”という負のイメージでしょうか。身近なようでいてあまり知られていない花粉は、実は不思議で驚くような存在です。

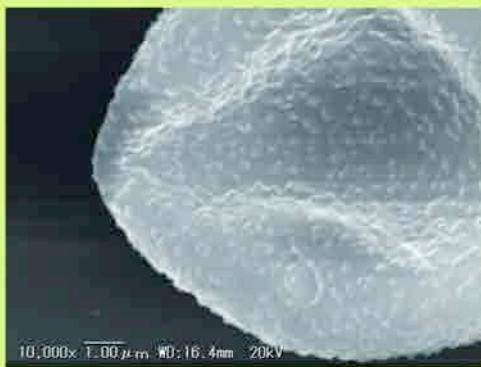
およそ直径 1/50 ミリのごく微小な丸い粒。25万種類もの花粉があり、その全ての形状が異なっています。

また、子孫を残すために遺伝子を「守る」「遠くまで運ぶ」という二つの重大なミッション遂行のため、紫外線、低・高湿度、熱などどんな過酷な環境にも耐える強靱な外壁の材料や構造を持っています。

このような花粉を人工的に真似ることができれば素晴らしいと思いませんか。私たちの生活にどんな可能性をもたらすでしょうか。市民講座でその可能性について紹介していきたいと思います。



花粉の電子顕微鏡写真



「人工花粉」の電子顕微鏡写真

主催：北海道大学総合博物館
共催：科学研究費新学術領域「生物規範工学」
協賛：高分子学会北海道支部

北海道大学総合博物館
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目
問合せ先：TEL: 011-706-2658 FAX: 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

久保英夫（北海道大学大学院理学研究院数学部門 教授）

数学とバイオミメティクス

2014年6月7日（土）

会場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時間：午後1時30分から午後3時30分

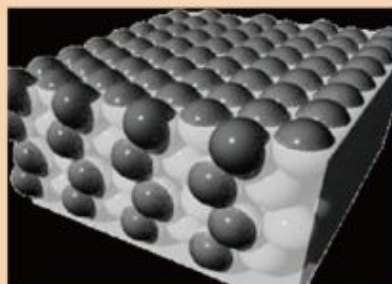


バイオミメティクスは生物学者と工学者が協働することにより次世代型のモノづくりを可能とする最先端の学問分野であり、何故そこに数学が関係してくるのか疑問に思われるかもしれません。確かに、数学は長い歴史を持っており、既に完成された学問という印象があることは否めません。しかしながら、数学は現実社会の変革を後押ししたり、逆に誘導されながら発展してきた学問です。

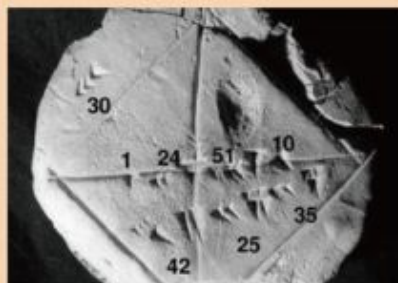
例えば、無理数の発見がギリシャ人の世界観を覆し、量子力学の誕生は非可換代数の発展を促すなど、多くの実例があります。であるならば、生物の技術体系の底流にも数学的構造が存在する可能性があり、それを解明することによって工学的な材料設計におけるより良い指針が得られるものと考えます。本講座ではそうした可能性について皆さんと一緒に考えてみたいと思います。



甲虫における構造色



シリコンエラストマー



バビロニアの数学の粘土板（Wikipedia より）

主催：北海道大学総合博物館
共催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
高分子学会北海道支部

北海道大学総合博物館
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目
問合せ先：TEL 011-706-2658 FAX 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

山崎剛史 (公益財団法人山階鳥類研究所 研究員)

鳥とバイオミメティクス

2014年7月5日 (土)

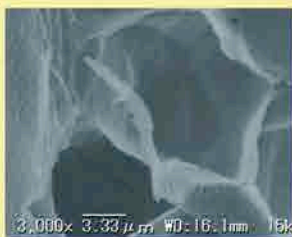
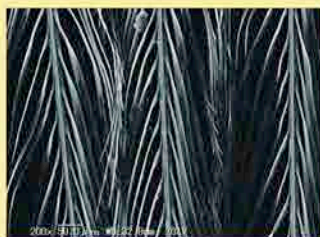
会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分



最近、生物多様性という言葉に耳にする機会が増えてきました。人間の活動のあおりを受け、多くの生き物が絶滅の危機に追いやられている、それが現代という時代です。でも、生物の多様性が失われると、実際のところ、いったい何が困るのでしょうか。それは私たちの生存基盤そのものだから、これが一つの重要な答えです。ですが、答えはそれだけにとどまりません。

いろいろな生物がいろいろな生き方をしている、私たちはそこから多くのことを学ぶことができます。生物に学ぶものづくりーバイオミメティクスーはいま熱い注目を集めている学術領域です。この世界に飛び込んだ一鳥類学者がその魅力と可能性を語ります。



主 催：北海道大学総合博物館
共 催：科学研究費新学術領域「生物規範工学」
高 分 子 学 会 北 海 道 支 部

北海道大学総合博物館
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目
問合せ先：TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

BIOMIMETICS

バイオミメティクス・市民セミナー

高梨琢磨（独立行政法人森林総合研究所 主任研究員）

生物が利用する音・振動の バイオミメティクス

2014年 8月 2日（土）

会 場：北海道大学総合博物館 / 知の交流コーナー

時 間：午後1時30分から午後3時30分

「閑さや 岩にしみ入る 蟬の声」という句で代表されるように、虫の音は古くから私たちに親しまれています。昆虫をはじめとする生物は音や振動を使って、仲間を見つけたり、敵から逃れたりしています。この生物の優れた能力を、本セミナーで解説します。そして、生物が利用する音や振動からヒントを得た、私たちの生活に不可欠な農業や工業の新しい技術へと発展できるバイオミメティクスについて紹介します。



カブトムシの雌雄（小島渉氏提供）



メスに対して超音波のラブソングを発するアノメイガのオス



マツノマダラカミキリの振動受容器（西野浩史氏提供）

主 催：北海道大学総合博物館
共 催：科学研究費 新学術領域「生物規範工学」
高 分 子 学 会 北 海 道 支 部

北海道大学総合博物館
060-0810 札幌市北区北10条西8丁目
問合せ先：TEL. 011-706-2658 FAX. 011-706-4029
E-mail: museum-jimu@museum.hokudai.ac.jp

「生物多様性を規範とする革新的材料技術」ニュースレター Vol. 3 No. 1
発行日 2014 年 7 月 28 日
発行責任者 下村政嗣（東北大学）
編集責任者 穂積 篤（独立行政法人 産業技術総合研究所）
制作 「生物規範工学」領域事務局
北海道大学電子科学研究所 生体分子デバイス研究分野研究室内
〒001-0021 札幌市北区北 2 1 条西 1 0 丁目
電話 011-706-9360 FAX 011-706-9361
URL <http://biomimetics.es.hokudai.ac.jp/index.html>